



СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

6(46) ' 2017

Заснований
у 2007 році

Наукове періодичне видання,
в якому відображені результати
наукових досліджень з розробки та
удосконалення систем управління,
навігації та зв'язку у різних
проблемних галузях.

Засновник:
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка

Адреса редакційної колегії:
Україна, 36011, м. Полтава,
Першотравневий проспект, 24

Телефон: +38 (066) 706-18-30
(консультації, прийом статей).

E-mail:
kozelnovae@ukr.net

Інформаційний сайт:
<http://www.pntu.edu.ua>

Реферативна інформація
зберігається: у загальнодержавній
реферативній базі даних
„Україніка наукова” та публікується
у відповідних тематичних серіях
УРЖ „Джерело”.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Голова:

КОЗЕЛКОВ Сергій Вікторович (д-р техн. наук, проф., Україна)

Заступники голови:

ШЕФЕР Олександр Віталійович (канд. техн. наук, доц., Україна)

ШУЛЬГА Олександр Васильович (д-р техн. наук, доц., Україна)

Члени:

БЛАУНШТЕЙН Натан Олександрович (д-р техн. наук, проф., Ізраїль)

ВЕСОЛОВСЬКИЙ Кшиштоф (д-р техн. наук, проф., Польща)

ІЛЬІН Олег Юрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КОРОБКО Богдан Олегович (д-р техн. наук, доц., Україна)

КОШОВИЙ Микола Дмитрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КУЧУК Георгій Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЛАДАНЮК Анатолій Петрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович (д-р техн. наук, проф., Німеччина)

МАШКОВ Віктор Альбертович (д-р техн. наук, проф. Чехія)

МАШКОВ Олег Альбертович (д-р техн. наук, проф., Україна)

МОРГУН Олександр Андрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ПОПОВ Валентин Іванович (д-р фіз.мат. наук, проф., Латвія)

СТАНКУНАС Йонас (д-р техн. наук, проф., Литва)

СТАСЄВ Юрій Володимирович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ФРОЛОВ Євгеній Андрійович ((д-р техн. наук, проф., Україна)

ХОРОШКО Володимир Олексійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЧОРНИЙ Олексій Петрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

Відповідальний секретар:

КОЗЕЛКОВА Катерина Сергіївна (д-р техн. наук, проф., Україна)

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор

Журнал індексується міжнародними бібліометричними та наукометричними базами даних: *Index Copernicus (Польща), General Impact Factor (ЄС), Google Scholar (США), Academic Resource Index (ЄС), Scientific Indexed Service (США).*

Затверджений до друку вченою радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (протокол № 7 від 30 листопада 2017 року)

Занесений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" (технічні науки) строком на п'ять років від дати включення наказом Міністерства освіти і науки України від 24.10.2017 № 1413 (додаток 7, п. 31)

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ГП від 16.11.2012 р.

З М І С Т

НАВІГАЦІЯ

<i>Андрєєв С.М., Жилін В.А., Угарова А.С.</i> Транспортно-навігаційна система моделювання руху маршрутного транспорту	4
<i>Shefer O.V.</i> Probe studies of localized plasma, as a method of increasing the interference of satellite radionavigational systems on the area of SC's orbit injection	9

КОНТРОЛЬ КОСМІЧНОГО ТА ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

<i>Головняк Д.В., Чалий В.В., Калімулін Т.М., Місюк Г.В.</i> Інтеграція різнорідних джерел спостереження в системі контролю повітряного простору	15
<i>Іванова В.И.</i> Особенности влияния гравитационного поля Солнца на эволюцию параметров солнечно-синхронной орбиты	19

РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОТЕХНІКА

<i>Барышев И.В., Щербина К.А., Вонсович М.А., Мсаллам Е.П.</i> Экспериментальное исследование качества фильтрации спектральной структуры доплеровского сигнала модулированным фильтром	24
<i>Бороздин Н.К., Дорогобид В.П., Таган О.О.</i> Электрические параметры однолучевого несимметричного излучателя	28
<i>Волосюк В.К., Жила С.С., Павліков В.В.</i> Квазіоптимальні алгоритми формування радіометричних зображень з високою роздільною здатністю в широкосмугових системах апертурного синтезу	32
<i>Казаков Е.Л., Казаков А.Е., Решетник В.М.</i> Экспериментальное исследование поляризационно-рассеивающих свойств радиолокационной цели цилиндрической формы с поглощающими материалами	37
<i>Кононов В.Б., Науменко А.М., Михаленко В.С.</i> Методи та засоби вимірювання параметрів амплітудно-модульованих сигналів	41
<i>Кононова О.А., Рак В.С., Браславець С.П.</i> Опис пристрою тестування інтегральних мікросхем на зразках озброєння та військової техніки	45
<i>Лісогорський Б.А., Таран І.А., Худов Г.В.</i> Оцінка потенційної точності траєкторних вимірювань в багатопозиційній системі радіолокаційних станцій контрбатареїної боротьби	49
<i>Обод И.И., Заволодько А.Э., Монго Б.В.</i> Повышение качества информационного обеспечения запросными системами наблюдения	53
<i>Рассомахин С.Г., Князев Е.И.</i> Математический метод синтеза цифровых частотно-избирательных рекурсивных фильтров	57
<i>Хижняк І.А.</i> Інтегрування мурашиного та ройового методів сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження	61

ПИТАННЯ УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Дмитриенко В.Д., Носков В.И., Мезенцев Н.В., Гейко Г.В.</i> Способ обнаружения и защиты от боксования дизель-поезда на основе нечёткой логики	65
<i>Жигилій С.М., Зима О.Є., Педько М.С.</i> Система автоматичного керування рухомими дебалансами механічного відцентрового збуджувача коливань	70
<i>Коржов И.М., Кропачек О.Ю.</i> Реализация вычислительных процедур системного информационного преобразования нестационарных выбросигналов средствами LabView	76
<i>Морозов О.О.</i> Визначення параметрів контролю операцій, що здійснюються складними системами	81
<i>Невлюдов І.Ш., Письменецький В.О., Фролов А.В., Чала О.О., Ємельянов М.А.</i> Аналіз ефективності використання кремнієвих концентраторних сонячних фотоелементів	85
<i>Островерхов М.Я., Сільвестров А.М., Кривобока Г.І.</i> Ідентифікація динаміки процесу нанесення ізоляції у виробництві кабелів	89

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ

<i>Гиль Н.И., Пацук В.Н.</i> Аналитическое описание условий взаимного расположения эллипса и области, ограниченной параболой	94
<i>Дубницький В.Ю., Філатова Л.Д., Ходырев А.И.</i> Относительная погрешность оценки энтропии непрерывной случайной величины, заданной плотностью распределения	98
<i>Ковтун А.В., Іванченко О.В., Іванченко А.О., Бойков І.В.</i> Удосконалення математичної моделі оцінки зміни технічного стану автомобільної техніки	103
<i>Нелюба Д.М., Гонтар М.М.</i> Розроблення математичної моделі системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, як об'єкта керування	107
<i>Podoshvelev Yu.G., Ichanska N.V.</i> Model of cheese-Osipov-Lancaster and its generation	113
<i>Саланда І.П., Барабаи О.В., Мусієнко А.П., Лукова-Чуйко Н.В.</i> Математична модель структури розгалуженої інформаційної мережі 5 покоління (5G) на основі випадкових графів	118
<i>Собчук А.В., Коваль М.О., Кравченко Ю.В., Барабаи О.В.</i> Математична модель функціонально стійкої безпроводної сенсорної мережі	122
<i>Khlood O.M., Yaskov G.N.</i> Packing homothetic spheroids into a larger spheroid with the jump algorithm	127

<i>Чугай А.М., Панкратов О.В., Романова Т.С., Стоян Ю.Є.</i> Оптимізація процесу 3D-друку для SLS технології адитивного виробництва	131
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ	
<i>Дуравкин Е.В., Ткачева Е.Б., Мухи-Алдин Х.М.</i> Применение теории сетевого исчисления при моделировании программно-конфигурируемых сетей	136
<i>Кассем Халіфе, Криховецький Г.Я., Кучук Г.А.</i> Оцінка вразливості системного програмного забезпечення	141
<i>Лобанов Л.П., Ярцев В.П., Сабадаш В.А.</i> Многоканальное устройство приоритетного обслуживания запросов для формирования информационных моделей дискретно-аналоговой формы представления данных	145
<i>Мартовицкий В.А., Рубан И.В.</i> Модель мультиагентной системы сбора и хранения информации	150
<i>Поповский В.В., Сокол Г.В.</i> Проактивные методы в решении задач электромагнитной совместимости в беспроводных телекоммуникационных системах	154
<i>Скулиш М.А., Вольвач С.О., Глоба Л.С.</i> Система керування якістю обслуговування у складних гетерогенних телекомунікаційних системах	158
<i>Тиртишніков О.І., Мавріна М.О., Рудь П.О.</i> Особливості апаратної реалізації помножувача на основі модифікованого дерева Уоллеса	163
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ	
<i>Басюк И.А.</i> Обобщённая структура информационной технологии процесса синтеза диэлектрических структур ..	167
<i>Бичков О.С., Арделян В.В.</i> Методи інформаційних технологій для дослідження неперервно-дискретної динаміки літального апарату	171
<i>Кацал Д.І., Данова М.О., Потапова М.В., Мандрікова Л.В.</i> Підхід до побудови тривимірних комп'ютерних моделей реальних об'єктів по фотозображенням	177
<i>Коваленко А.В.</i> Масштабирование имитационной модели технологии тестирования безопасности	181
<i>Kosenko V.V.</i> Information technology of managing parameters of information and communication network in the systems of critical infrastructure	185
<i>Могілатенко А.С., Обідін Д.М., Кондратенко О.П., Берднік П.Г.</i> Аналіз методів формалізації процесу управління інформаційним потоком повідомлень про повітряні об'єкти в автоматизованій системі управління регіональних центрів управління повітряним рухом	190
<i>Morozova O.I.</i> Features of a formal representation of multiform processes in the systems of training, education and production	194
<i>Рахими Я.</i> Знаниеориентированный подход к организации поддержки принятия решений по формированию полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину	197
<i>Свид І.В., Обод А.І.</i> Поеднання даних оглядових систем спостереження повітряного простору	202
<i>Темников В.А.</i> Метод повышения эффективности работы системы поддержки принятия решений по управлению информационной безопасностью авиатранспортных предприятий	206
<i>Шостак И.В., Данова М.А., Капитан Р.Б.</i> Разработка типового фрагмента мультиагентной системы поддержки принятия координирующих решений по организации производства на промышленном предприятии	210
ЗАПОБІГАННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ	
<i>Бабій Ю.О.</i> Формалізація процесу моніторингу рухомих об'єктів на сухопутному кордоні України волоконно-оптичними засобами охорони	215
<i>Глива В.А., Ніколаєв К.Д., Колумбет В.П., Левченко Л.О.</i> Методологія дослідження низькочастотних електромагнітних полів в умовах сталого розвитку технологій	219
<i>Запорожець О.І., Ковалець І.В., Кацман М.Д.</i> Оцінювання наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами	224
<i>Триснюк В.М., Нікітін А.А., Шумейко В.О.</i> Алгоритм оброблення інформації про радіоактивне забруднення місцевості з використанням даних ДЗЗ та ГІС	233
<i>Тютюник В.В., Черногор Л.Ф., Калугин В.Д., Агазаде Т.Х.</i> Оценка влияния энергетических эффектов в системе солнце–земля–луна на уровень сейсмической активности территории земного шара	238
<i>Чуб І.А., Новожилова М.В., Карпенко М.Ю.</i> Метод мінімізації впливу надзвичайної ситуації з можливими викидами небезпечних хімічних речовин в атмосферу	247
ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ	
<i>Петренко О.М., Любарський Б.Г.</i> Оптимізація режимів роботи охолодження тягового двигуна електровоза	251
ЗВ'ЯЗОК	
<i>Боряк Б.Р., Сільвестров А.М.</i> Аналіз ефективності застосування адаптивного двоконтурного фільтра-екстраполятора в залежності від форми сигналу	255
<i>Шишацький А.В., Кучук Н.Г., Прокопенко С.М.</i> Методика синтезу раціональної топології безпровідних самоорганізуючих мереж спеціального призначення з використанням генетичного алгоритму	260
АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ НАВЧАННЯ	
<i>Лысенко И.В.</i> О математической подготовке студентов, обучающихся по специальности «Компьютерная инженерия»	265
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	269

Навігація

УДК 656.132.658

С.М. Андреев, В.А. Жилін, А.С. Угарова

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

ТРАНСПОРТНО-НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МАРШРУТНОГО ТРАНСПОРТУ

Обґрунтовано необхідність роботи у напрямку підвищення якості транспортного забезпечення у м. Харкові. Визначено фактори, що впливають на швидкість руху та затримки на дорозі, а також їх відносну вагу. Запропоновано імітаційну модель системи моделювання руху громадського транспорту. Розроблено концептуальну схему транспортно-інформаційної системи відображення руху маршрутних транспортних засобів. Розроблено та програмно реалізовано алгоритм моделювання руху транспортного засобу у режимі реального часу.

Ключові слова: транспортна інфраструктура, імітаційна модель, моделювання руху транспорту, транспортно-інформаційна система.

Актуальність проблеми та постановка задачі

Транспортна інфраструктура — одна з найважливіших складових частин інфраструктури міста. Якість транспортних послуг є одним з найважливіших чинників, що впливають на рівень життя у місті та забезпечують комфортне існування в ньому.

Одною зі складових забезпечення якості транспортних послуг є можливість інформування пасажирів про час прибуття маршрутного транспортного засобу на зупинку. У багатьох випадках це питання вирішують розміщенням на зупинці спеціального табло з розкладом руху. Зупинки громадського транспорту в Україні у більшості не обладнані такими табло. Крім того, за багатьма причинами, розклад руху маршрутних транспортних засобів швидко може ставати неактуальним, а актуалізація таких табло пов'язана з великими часовими та матеріальними затратами. У місті Харкові станом на 2017 рік лише дві зупинки громадського транспорту обладнані спеціальним електронним табло, на якому зображується час до прибуття транспортного транспорту. Ці табло працюють у тестовому режимі та розповсюджуються лише на трамваї і тролейбуси.

Таким чином, транспортна інфраструктура міста не виконує важливу функцію з інформування пасажирів. Цю функцію беруть на себе комерційні організації. В Україні діє міжнародна компанія «Easy way», що забезпечує користувачів інформацією про розклад та рух транспорту. Станом на 2017 рік впроваджено технічне забезпечення та відкритий доступ до GPS-даних громадського транспорту у 14 містах України. Впровадження подібних заходів у всіх містах країни на даному етапі є неможливим за багатьма причинами, серед яких — невідосконала система управління транспортом, приватна влас-

ність на громадський транспорт, конкуренція між перевізниками, тощо.

В 2015 році харків'янами була подана електронна петиція щодо встановлення на увесь міський транспорт GPS-маячків для відслідковування їх переміщення. За відповіддю міського голови, «на сьогодні (на 2015 р.) з метою істотного підвищення якості обслуговування пасажирів та ефективності використання рухомого складу, що випускається на лінію, у м. Харкові впроваджені основні елементи автоматизованої системи диспетчерського управління (АСДУ), яка призначена для управління та автоматизованого контролю за роботою міського наземного пасажирського транспорту шляхом впровадження системи GPS-позиціонування та передачі в диспетчерський центр координат місцезнаходження міського транспорту, відображення цієї інформації на електронній карті й обробки отриманої та супутньої інформації на двох рівнях — транспортного підприємства і центральної диспетчерської служби. У рамках впровадження АСДУ весь рухомий склад трамваїв, тролейбусів та автобусів обладнаний пристроями GPS-позиціонування та на базі КП «Міськелектротранссервіс» створений єдиний диспетчерський центр, який координує рух наземного пасажирського транспорту з рухом поїздів метрополітену і здійснює управління рухом на основі системи GPS-позиціонування. Подальший розвиток вказаного проекту передбачає також впровадження вебсторінки у мережі Інтернет. Створення такої сторінки для виведення інформації про місцезнаходження рухомого складу в онлайн-режимі передбачає розробку програмного забезпечення, модернізацію існуючих технічних засобів діючої системи АСДУ, а також подальшу її підтримку. На цей час комунальними підприємствами «Міськелектротранссервіс» та «Міський інформаційний центр» разом із зацікавле-

ними організаціями триває робота з впровадження та удосконалення вказаної системи». Але досі зазначені роботи не були виконані. Варто відмітити, що у період з 2014 по 2016 року працював мобільний додаток «Маршрутки», який забезпечував відображення переміщення транспортних засобів по маршруту. Додаток працював нестабільно і на кінець 2016 року за невідомими причинами припинив свою активність.

Таким чином, актуальним проектом для м. Харків є створення системи інформування пасажирів про рух транспорту, яка була б незалежна від GPS-даних. У цій роботі пропонується вирішення поставленої задачі за допомогою інструментів математичного моделювання на основі статистичних і стохастичних даних. Пропонується імітаційна модель системи інформування про дорожню обставину та час прибуття конкретного транспортного засобу на зупинку. Розроблена модель дозволяє проводити аналіз об'єкту

дослідження, а саме – визначити чинники, що впливають на рух на маршруті, визначити ступінь їх впливу, робити прогнози, вивчати, який вплив матимуть змінення значень тих чи інших факторів.

За даними аналізу є можливим зробити висновки та рекомендації щодо інтервалів руху та кількості транспортних засобів задля забезпечення транспортом мешканців міста.

Розроблений алгоритм пропонується реалізувати програмно за допомогою мови програмування C# у середовищі розробки програмного забезпечення Visual Studio 2012.

Розробка системи моделювання руху маршрутних транспортних засобів

Перший етап роботи полягає у розробці концептуальної моделі транспортно-інформаційної системи. Модель побудована у нотатції UML "Діаграма прецедентів" (рис. 1).

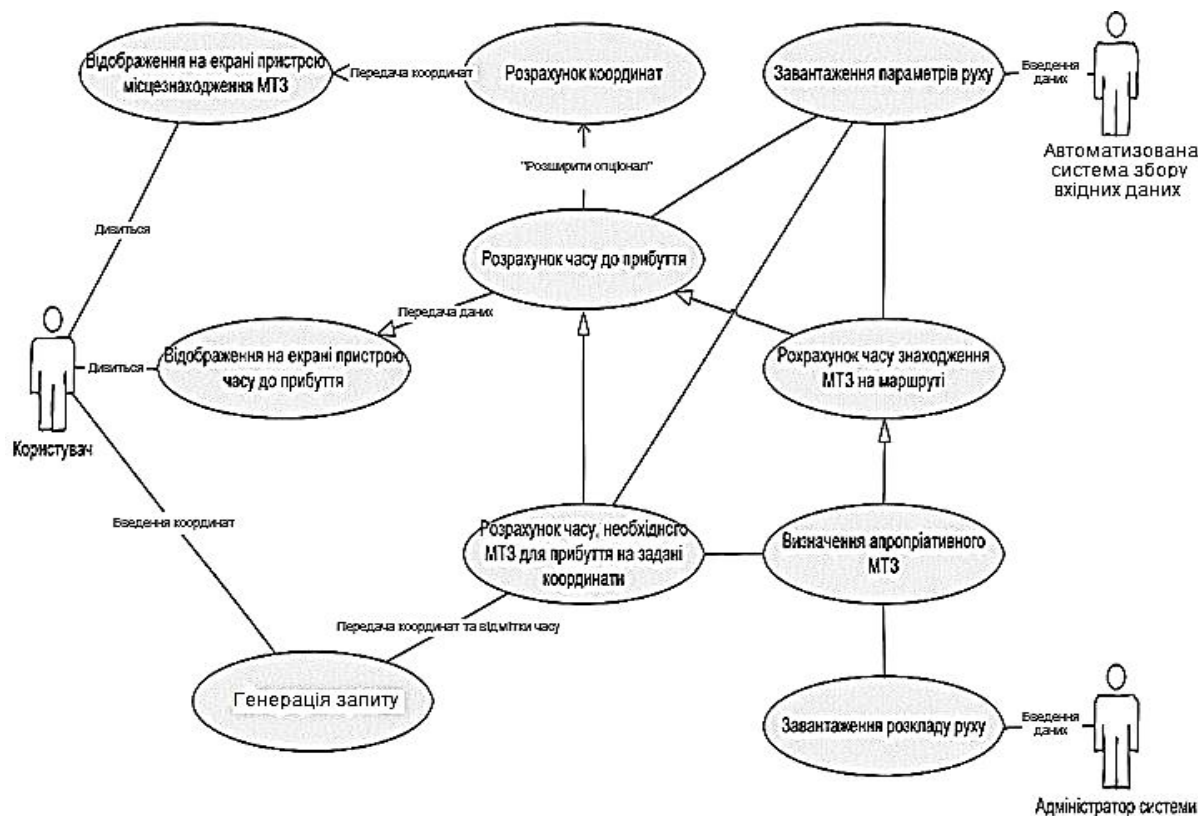


Рис. 1. Концептуальна схема транспортно-навігаційної системи

На діаграмі зображено три актора — користувач системи, що подає запит, атрибутами якого є час та координати; адміністратор, що завантажує розклад руху (час початку руху); автоматизована система збору даних про дорожню обставину, тобто дані, що впливають на швидкість руху і затримки на маршруті. Робота системи починається із запита користувача і закінчується отриманням ним інформації, що була запитана.

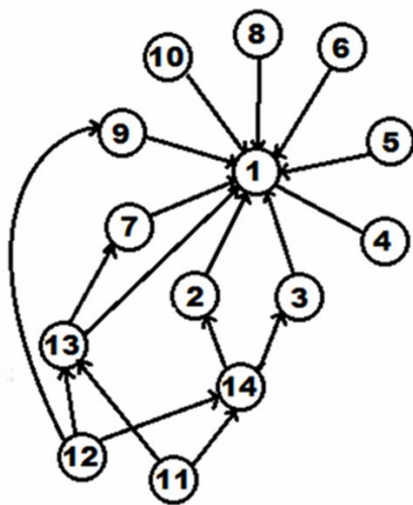
Другий етап роботи полягає у аналізі факторів, що впливають на час, який потрібен транспортному

засобу, щоб потрапити з пункту А у пункт Б. Було встановлено такий перелік факторів:

- швидкість руху;
- кількість зупинок;
- тривалість зупинок;
- кількість світлофорів;
- тривалість зупинок на світлофорах;
- кількість нерегульованих перехресть;
- тривалість затримки на нерегульованих перехрестях;
- кількість нерегульованих переходів;

- ймовірність зупинки на нерегульованих переходах;
- погодні умови (видимість, ожеледь);
- період доби;
- день тижня;

- транспортний потік на дорозі;
 - кількість пасажирів.
- Взаємовплив факторів відображено на оргграфі (рис. 2).



- 1) Ідеальна швидкість руху
- 2) Кількість зупинок
- 3) Тривалість зупинок
- 4) Кількість світлофорів
- 5) Тривалість зупинок на світлофорах
- 6) Кількість нерегульованих перехресть
- 7) Тривалість затримки на нерегульованих перехрестях
- 8) Кількість нерегульованих переходів
- 9) Тривалість затримки на нерегульованих переходах
- 10) Погодні умови (видимість, ожеледь)
- 11) Період доби
- 12) День тижня
- 13) Транспортний потік на дорозі
- 14) Кількість пасажирів

Рис. 2. Орграф взаємовпливів факторів дорожнього руху

Наступний етап проекту — розробка імітаційної моделі інформаційно-транспортної системи. Мо-

дель складається з трьох блоків: блок вихідних даних, блок розрахунків та блок виводу (рис. 3).

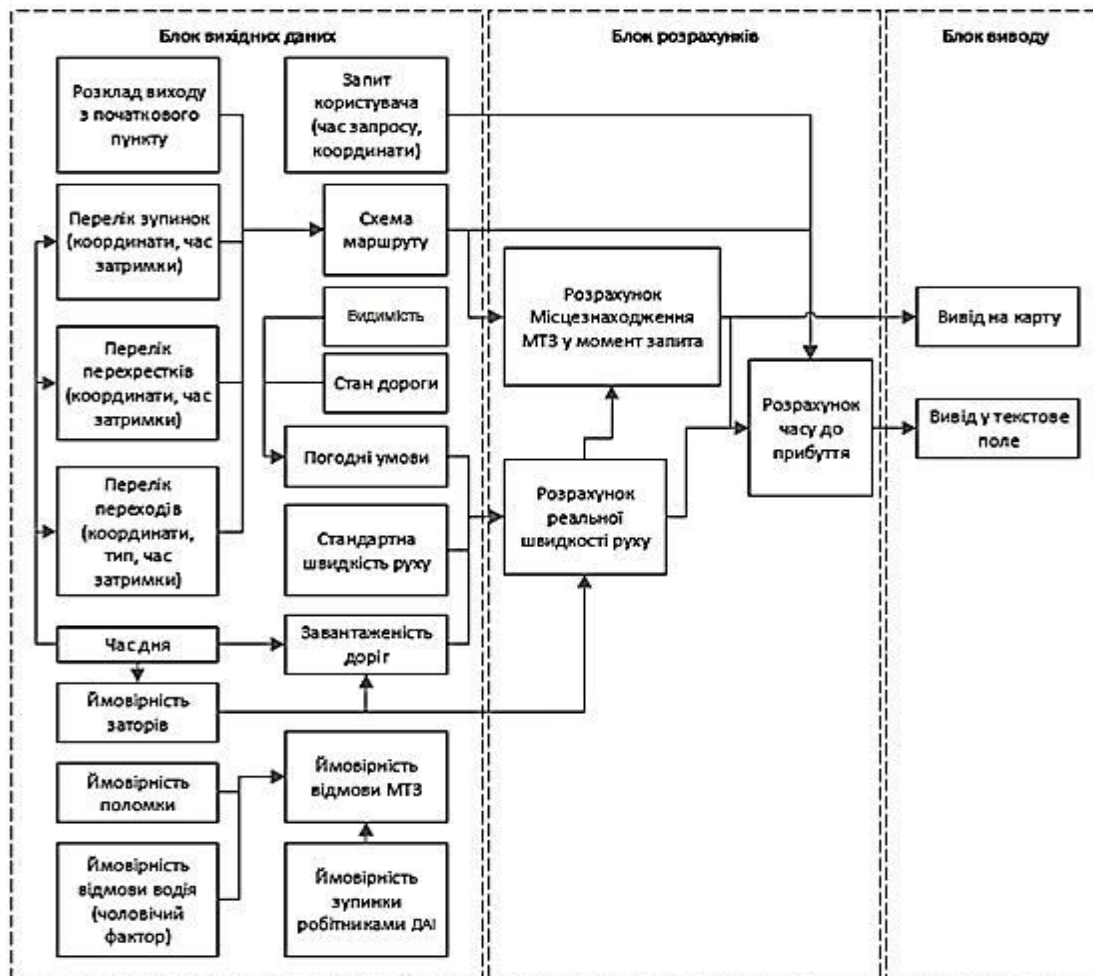


Рис. 3. Концептуальна модель транспортно-навігаційної системи

Кінцевою ціллю моделі є надання інформації користувачеві про час до прибуття обраного користувачем транспортного засобу та його поточне місцезнаходження (блок виводу). Блок вихідних даних являє собою базу даних, що містить різноманітні дані (як детерміновані: розклад руху, елементи маршруту, так і стохастичні, для отримання яких необхідно провести статистичні дослідження). Для організації бази даних цього блоку було проведено класифікацію вхідних даних (рис. 4).

Для розрахунку часу до прибуття необхідні дані про місцезнаходження користувача та місцезнаходження маршрутного транспортного засобу (МТЗ), знати швидкість руху та мати інформацію про затримки на зупинках та світлофорах. Час до прибуття дорівнює:

$$T_{\text{приб}} = \frac{X_{\text{зап}}}{X_{\text{МТЗ}}} + t_{\text{доп.св.}} + t_{\text{доп.зуп.}}, \quad (1)$$

де $T_{\text{приб}}$ – час до прибуття; $X_{\text{зап}}$ – координата зупинки; $X_{\text{МТЗ}}$ – координата МТЗ; $t_{\text{доп.св.}}$ – час затримки на світлофорах; $t_{\text{доп.зуп.}}$ – час затримки на зупинках.

Час затримки розраховується за формулами:

$$t_{\text{доп.св.}} = \sum_{i=1}^m t_{\text{св.і.}}; \quad (2)$$

$$t_{\text{доп.зуп.}} = \sum_{i=1}^n t_{\text{зуп.і.}}; \quad (3)$$

де n – кількість зупинок, що знаходяться між МТЗ та користувачем; m – кількість світлофорів, що знаходяться між МТЗ та користувачем; $t_{\text{св.і.}}$ – час затримки на i -тому світлофорі; $t_{\text{зуп.і.}}$ – час затримки на i -тій зупинці. Для визначення $t_{\text{зуп.і.}}$ необхідно проводити статистичні дослідження та вивчати, як змінюється затримка за різними умовами та у різну пору доби. У даному проекті прийнято, що $t_{\text{зуп.і.}}$ дорівнює 1 хв або 0.5 хв в залежності від типу зупинки.

Час затримки на світлофорі $t_{\text{св.і.}}$ може мати значення від 0 до максимального значення тривалості червоного світла. Це випадкова величина, що може бути розрахована за формулою:

$$t_{\text{св.і.}} = (\ell = 1; 0; c) \quad (4)$$

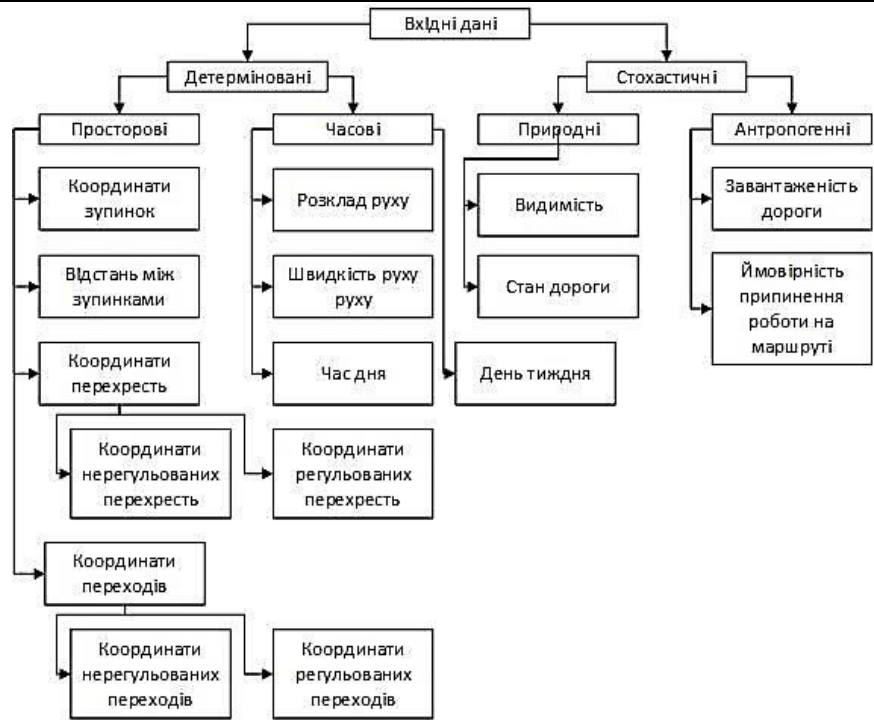


Рис. 4. Схема класифікації вхідних даних за походженням для моделювання руху дорожнього транспорту

де ℓ – змінна, що відповідає за значення сигналу світлофора і має значення «1» = зелений та «0» = червоний або жовтий; c – середнє значення тривалості сигналу червоного світла.

Якщо враховувати стохастичну невизначеність, то ℓ є випадковою подією, що може приймати значення 0 або 1, і залежить від режиму роботи світлофору. Значення ℓ може бути обчислено одним із шляхів:

$$\ell = (\text{rnd}(1) < R_n; 0; 1), \quad (5)$$

$$\ell = (\text{rnd}(1) > R_n; 1; 0), \quad (6)$$

де R_n – нормована тривалість червоного сигналу світлофора; $\text{rnd}(1)$ – випадкова величина від 0 до 1.

Маючи тривалість червоного сигналу в секундах, нормоване значення можна отримати:

$$R_n = R / (R + G), \quad (7)$$

де G – тривалість зеленого сигналу світлофору, c .

Для розрахунку місцезнаходження МТЗ необхідно знати час виходу МТЗ з кінцевої зупинки, тривалість руху, кількість зупинок та світлофорів, що було пройдено цим МТЗ за час, що він рухається. Розрахунок може здійснюватись таким чином:

$$X_{\text{МТЗ}} = (T_{\text{шл}} - t_{\text{доп.св.}} - t_{\text{доп.зуп.}}) \cdot V, \quad (8)$$

де $T_{\text{шл}}$ – тривалість поїздки конкретного МТЗ.

У цьому випадку $t_{\text{доп.св.}}$ та $t_{\text{доп.зуп.}}$ розраховуються за (2) і (3), але n та m – кількість зупинок та світлофорів, що відповідно знаходяться між МТЗ та кінцевою зупинкою, тобто ті зупинки та світлофори, на яких вже було витрачено час.

Блок виводу має два підблоки: вивід на електронну карту або схему маршруту позначку місцезнаходження, яке можна визначити за (8), та підблок виводу чисельного значення часу, необхідного МТЗ для прибуття на задану зупинку, що визначається за співвідношенням (1). Розроблену модель було апробовано за допомогою середовища розробки Microsoft Visual Studio 2012 на мові програмування С# у режимі реального часу. Розроблений програмний додаток дозволяє обрати маршрут та розраховує час до прибуття транспортного засобу (рис. 5).

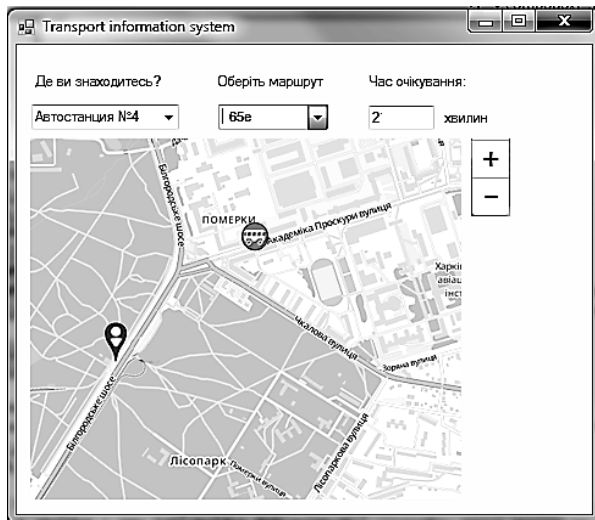


Рис. 5. Проект інтерфейсу транспортно-навігаційної системи

У подальшому доцільно впровадити у програмний додаток картографічну основу і модуль розрахунку та виводу місцезнаходження транспортного засобу.

Висновки

1. Проаналізовано сучасний стан проблеми відсутності інформування пасажирів про актуальну дорожню обставину та рух громадського транспорту у місті Харкові. Обґрунтовано необхідність проведення робіт у напрямку вирішення цієї проблеми.

2. Визначено фактори, що впливають на швидкість руху та затримки на дорозі, у тому числі визначено найбільш та найменш вагомі фактори.

3. Розроблено концептуальну схему системи інформування користувача про час прибуття маршрутного транспортного засобу та відображення дорожньої обставини у режимі реального часу.

4. Розроблено та реалізовано алгоритм моделювання руху маршрутного транспортного засобу.

Розроблена модель дозволяє включати та виключати з аналізу різні фактори впливу і аналізувати та інтерпретувати результати. Це забезпечує визначення закономірності взаємних впливів факторів на маршруті, аналіз пасажиропотоку в різних умовах. Дані такого аналізу можуть бути використані для оптимізації руху транспортних засобів та підвищення якості транспортного сервісу міста.

Список літератури

1. Васильєва, І.К., Попов, А.В., Єльцов, П.Є. Математичне моделювання в геоінформаційних системах. – Нац. аерокосмічний ун-т «ХАІ», 2014. – 100 с.
2. Швецов, В. И. Математическое моделирование транспортных потоков М.: Стройиздат, 1974.– 138 с.
3. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука / В.М. Томашевський. – К.: Видавнича група BVH, 2005. – 352 с.
4. Краткосрочное прогнозирование пассажиропотоков на основе статистических данных, полученных эмпирическим путем [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.sirius.su>.
5. Електронні петиції [Електронний ресурс].- Режим доступу <http://petition.city.kharkov.ua/uk/>
6. Прасоленко А. В. К вопросу о критериях эффективности функционирования транспортной сети города // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – Вып. 1/2 (19). – 15-15.
7. GPS-дані міста на одній карті [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://www.eway.in.ua/blog>.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ТРАНСПОРТНО-НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНОГО ТРАНСПОРТА

С.М. Андреев, В.А. Жилин, А.С. Угарова

Обоснована необходимость работы в направлении повышения качества транспортного обеспечения в городе Харькове. Определены факторы, которые влияют на скорость движения и задержки на дороге, а также их относительный вес. Предложена имитационная модель системы моделирования общественного транспорта. Разработана концептуальная схема транспортно-информационной системы отображения движения маршрутных транспортных средств. Разработан и программно реализован алгоритм моделирования движения транспортного средства в режиме реального времени.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, имитационная модель, моделирования движения транспорта, транспортно-информационная система.

TRANSPORTATION-NAVIGATIONAL SYSTEM OF SIMULATION OF MOTION ROUTE TRANSPORT

S.M. Andreev, V.A. Zhilin, A.S. Ugarova

The necessity of work in the direction of improving the quality of transportation in the city of Kharkov is substantiated. The factors that influence the speed and delays on the road, as well as their relative weight, are determined. An imitation model of the public transport modeling system is proposed. The conceptual scheme of the transport information system for displaying the movement of route vehicles has been developed. A real-time simulation of the vehicle's motion has been developed and software implemented.

Key words: transport infrastructure, simulation model, traffic simulation, transport and information system.

PROBE STUDIES OF LOCALIZED PLASMA, AS A METHOD OF INCREASING THE INTERFERENCE OF SATELLITE RADIONAVIGATIONAL SYSTEMS ON THE AREA OF SC'S ORBIT INJECTION

In article the method of increasing the noise immunity in satellite radio navigation systems during the spacecraft orbit injection, using the new internal characteristics of localized plasma, which are revealed by probe researches is suggested. Research of potential axial, radial and azimuthally plasma's in homogeneities are investigated. The results of the studies disprove the assumption about plasma's azimuthally in homogeneity existence, which should have occurred under the influence of discrete streams of fast electrons. The homogeneity and equipotentiality of localized artificial plasma are finally established and they make possible its utilizing in the SC's antenna compartment for the reliable communication channels through the ionized external medium formation.

Keywords: spacecraft, plasma, noise immunity, satellite radio navigational system, probe measurements, plasma density, inhomogeneities.

Introduction

One of the alternative approaches of satellite communications' noise-immunity with the spacecraft (SC) ensuring in the area of its orbit injection, is the usage of a methodology for plasma's density reducing that occurs around SC's corps during its passage into the ionospheric flight area [1]. Plasma can manifest itself as a conductor, or as an insulator according to the electromagnetic waves [2]. The presence of a magnetic field in plasma, largely determines its properties and behavior.

In an article [3] the reduction of plasma's density in the vicinity of antenna SC's compartment with the help of generation of low-temperature homogeneous artificial plasma's with negative radiation is proposed. Mentioned plasma, during its interaction with external plasma on an elementary level lessens the density of the last one that contributes the passage of the radio waves.

The purpose of the article: the definition of important internal characteristics of low-temperature plasma that will contribute to the creation of optimal conditions for the passage of communication radio signals with SC.

To achieve that goal a method of probe researches is proposed.

The main part

Locality and high precisions of measured characteristics are the main advantages of probe method. The other advantage is a relative simplicity of apparatus that is being used [4] and that allows scientists to get the required result quickly and without high costs. However, the undeniable advantages of the method that are burdened by the complexity of theoretical description, and that is conditioned by the presence of a number of factors, such as possible axial, radial and azimuthal heterogeneities.

By measured volt-ampere characteristic of the probe, according to the optimal conditions, it is possible to determine the temperature of electrons T_e , their concentration N_e , the potential of the undisturbed plasma V_{pl} in the vicinity of the probe, and the function of electrons' distribution at velocities or energies $f(E)$.

Special probe circuits [5] provide us with some information about the oscillations, flows, and drift diffusion processes in plasma. The range of pressure variations in which the probe method can be used during plasma studies, covers more than seven orders, starting with $p \geq 0,00133$ Pa.

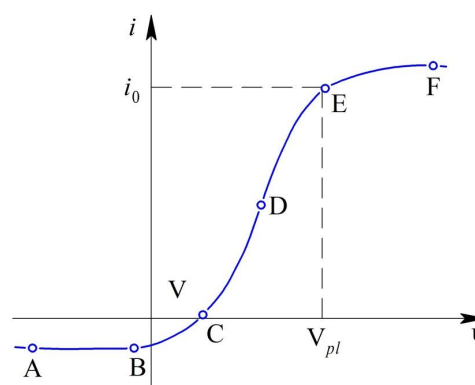


Fig. 1. General view of probe characteristics: AC - ion probe current; CF - an electron probe current

A range of concentration that is measured makes up eight orders ($10^6 - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). During some recent years, the theory and experimental technique have been greatly improved, thus, the probe method is one of the most effective means of plasma diagnosis [6].

During the utilizing of probes with a negative potential V_s according to plasma, the entire current that is entering, is the current of positive ions i_i , Fig. 1. In this

case, according to Fig. 1, the current of the probe will correspond to the ion current of saturation i_{i0} :

$$i = i_{eo} = \frac{1}{4} n_i \cdot e \cdot \bar{v}_i \cdot S. \quad (1)$$

With the reduction of negative potential on the ion current, the electron current that is created by fast electrons that passed through the electric field of probe's retardation is superimposed. In the process of further reduction of negative potential, the electron current i_e begins to increase on the probe, which is connected with a decrease in the electric field of the probe slowing down and a reduction of thickness of some positive charge space near the probe surface. At the CD section, the electron current considerably exceeds the ionic one, and its value corresponds to the expression:

$$i_e = \frac{1}{4} N_e \cdot e \cdot \bar{v}_l \cdot S \cdot \exp\left(\frac{eV_s}{kT_e}\right), \quad (2)$$

or

$$i_e = i_{eo} \cdot \exp\left(\frac{eV_s}{kT_e}\right). \quad (3)$$

Since the average ion velocity \bar{v}_i is less than the average electron velocity \bar{v}_e , and when $U = V_{pl}$, the contribution of ions to the probe's full current becomes smaller and smaller, in the current of the probe characteristic E , the probe current is equal to the electron one

$$i = i_{eo} = \frac{1}{4} n_e \cdot e \cdot \bar{v}_e \cdot S, \quad (4)$$

where $\bar{v}_e = \sqrt{8kT_e/(\pi m)}$, and a point $E - i_{eo}$ is an electron current.

The source of systematic errors, during the plasma's studies by the method of probes, is the discrepancy between the method's preconditions and the real conditions of its usage. As it is shown in [6, 7], in this case the following errors may occur:

1. The influence of the probe's size. It is necessary that the size of the probe and the layers that surround it will be smaller in comparison with the size of the surrounding plasma. In this case, the collision between charges in the vicinity of probe layers should be absent. A condition during which there is no collision, when $T_e \geq T_i$ for a cylindrical probe, looks like this:

$$R_c \ll (T_i/T_e)^{1/2}, \quad (5)$$

where R_c – radius of the probe layer.

Collisions between electrons are absent, whether probe's radius

$$r_s \ll \bar{\lambda}_e. \quad (6)$$

2. Pollution of the probe's surface changes the work of metal's output and leads to a sharp increase of

probe's ohmic resistance. Because of this, its characteristic is distorted.

3. The influence of probe's isolation. The probe's isolator surface charging negatively to the size of the floating potential, and is surrounded by a layer of positive spatial charge, this layer reduces the action of probe's collecting surface.

For correct probe studies, it is necessary to use probes of small sizes, at low gas pressures with unpoluted probes and with a thin insulation. In probe studies of localized plasma, a probe with the length $5,0 \cdot 10^{-3}$ m, and diameter $0,07 \cdot 10^{-3}$ m from molybdenum, is used.

The electron distribution function is one of the most important quantities that characterizes plasma. Kinetic Boltzmann equation for the function of electron velocity distribution looks like the following:

$$\frac{\partial}{\partial t} f(\bar{r}, \bar{v}, t) + \bar{v} \text{grad}_{\bar{r}} f(\bar{r}, \bar{v}, t) + \frac{e}{m} \left(\bar{E} \frac{I}{C} [\bar{v} \cdot \bar{H}] \text{grad}_{\bar{v}} \cdot f(\bar{r}, \bar{v}, t) + \sum S \right) = 0, \quad (7)$$

where $f(\bar{r}, \bar{v}, t)$ – a distribution function, moreover, quantity $f(\bar{r}, \bar{v}, t) d\bar{v} d\bar{r}$ determines an average number of electrons in the value $d\bar{v} d\bar{r}$, here \bar{v} – electron's velocity, and \bar{r} – appropriate radius vector, \bar{H} – a tension of magnetic field.

The density of electrons N_e , the average electrons' energy \bar{E}_e and the electron current j at a point \bar{r} at a time t determines by the distribution function, like this:

$$N_e = \int f(\bar{r}, \bar{v}, t) d\bar{v}, \quad (8)$$

$$\bar{E}_e = \frac{1}{N_e} \int \frac{mv^2}{2} f(\bar{r}, \bar{v}, t) d\bar{v}, \quad (9)$$

$$j = \int e\bar{v} f(\bar{r}, \bar{v}, t) d\bar{v}. \quad (10)$$

$\sum S$ – collision integral, which describes the changes in the function during electrons' collisions between themselves S_e , elastic collisions with molecules S_m^n , inelastic collisions with molecules S_m^{hn} and collisions with ions S_i . In a general case

$$\sum S = S_m^n + S_m^{hn} + S_i + S_e. \quad (11)$$

Integro-differential equation (7) is nonlinear, but its solution in a general form represents a very complicated task. Obtaining the distribution of electrons on the basis of this equation's solution requires clarification of much elementary processes in which the electron takes part. A part of these processes is not known at all, and the other part is known only approximately.

Regarding to this, an important role is played by the experimental determination of the distribution of

electrons by energies $f(E)$. On the basis of the obtained $f(E)$, one can determine some important internal plasma's characteristics: such as average energy \bar{E}_e and electron concentration N_e . The functions of the electrons' distribution $f(E)$ allow us to consider about the processes of excitation, ionization, the creation of inverse populations of laser levels, and others.

Modern methods of measuring the electrons' energy distribution are based on the probe method. Their basis is an obtaining of second derivative of electron current on the probe and measuring the plasma's potential. The second derivative of electron current with the help of the Drewiessen correlation [8] is connected with the electrons' distribution by energies, as following.

The electrons in the prism layer, in the braking electric field, reach the probe's surface without collisions. The expression for the electric current that entering on the probe, in this case, looks like the following:

$$i_e = \frac{1}{4} e N_e S \int_{v_1}^{\infty} v F(v) \left(1 - \frac{2eV_s}{mv^2} \right) dv, \quad (12)$$

where v – module of electrons' velocity; V_s – probe's potential relatively to the potential of undisturbed plasma V_{pl} , in a given point; v_1 – minimal velocity, in which an electron can reach a probe, connected with the probe's potential in a correlation

$$v_1 = \left(\frac{2eV_s}{m} \right)^{1/2}.$$

After twice differentiating (12), one can obtain the formula of Drewiessen [8]

$$F(v) = \frac{4m}{e^2 S} \cdot V_s \frac{d^2 i_e}{dV_s^2}. \quad (13)$$

The transition to the function of electrons' distribution by energies, one can obtain:

$$f(E) = \frac{2\sqrt{2}}{eS} \cdot \sqrt{\frac{m}{e}} \cdot \sqrt{V_s} \cdot \frac{d^2 i_e}{dV_s^2}. \quad (14)$$

During all these the electrons' concentration is

$$N_e = \int_0^{\infty} f(E) dE.$$

Here $f(E)dE$ – is a number of electrons in an interval of energies from E to $E+dE$. From (14) it is visible, that for obtaining the electrons' distribution function it is necessary to measure the second derivative of electric current at the voltage and probe potential V_s , relatively to the potential of the plasma space V_{pl} . The second derivative of the electron current is taken on the basis that in the region to $V_s \leq 0$ it is considerably bigger than the second derivative of the ion current

$i_e'' \gg i_i''$. According to [9], this assumption is true $f(E)$ as long as it is measured not in a wide range of energy, which is equal $E \leq (3 \div 4) \cdot \bar{E}_e$,

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{\infty} E f(E) dE}{\int_0^{\infty} f(E) dE}. \quad (15)$$

Various experimental methods of $f(E)$ measuring and they differ mainly in the ways of obtaining a second derivative of full probe current voltage.

Recently, the determination of second derivative of probe current by voltage is carried out by the method of applying small value to the probe range of alternating signal [9].

In the probe's vicinity, regardless to the source of constant potentials, a source that gives small variable signal v is introduced. In this case, probe's potential $V + v$, and the current is:

$$i = i(V + v). \quad (16)$$

Probe current can be represented by Taylor's number [10]:

$$i = i(V) + v i'(V) + \left(\frac{v^2}{2!} \right) i''(V) + \left(\frac{v^3}{3!} \right) i'''(V), \quad (17)$$

where $i = \frac{di}{dV}$; $i'' = \frac{d^2 i}{dV^2}$ and so on.

Depending on the shape of a small variable signal, several variants of the method are distinguished:

1. A method of second harmonica [11]

$$v(t) = v_0 \sin \omega t. \quad (18)$$

2. A method of modulation by sinusoid [12]

$$v(t) = v_0 (1 + \cos \Omega t) \sin \omega t. \quad (19)$$

3. A method of modulation by rectangular signal [13]

$$v(t) = v_0 \left[1 + \frac{\pi}{4} \cos \omega t - \frac{\cos^2 \omega t}{3} + \dots \right]. \quad (20)$$

4. A method of intermodulation [11]

$$v(t) = v_{01} \cdot \sin \omega_1 t + v_{02} \sin \omega_2 t. \quad (21)$$

In localized plasma, the second harmonic method was used to measure the second derivative of the probe current by voltage. Substituting in (17) equation (18) and converting the members of correlation with $\sin \omega t$, one can obtain

$$i_{2\omega} = \frac{v_0^2}{4} i''(V) \cos 2\omega t \quad (22)$$

From everything that was mentioned above, it is clear that in order to determine the second derivative of the probe current by voltage, it is necessary to measure the amplitude of the second harmonic of the variable signal

$$i''(V) = \frac{4i_{2w}}{v_0^2 \cos 2wt} \quad (23)$$

The results of probe measuring $i(V)$ and $i''(V)$ showed the important result during probe's displacement in plasma with a localized discharge along the axis and the radius of discharged device.

For carrying out the axial probe measurements $i(V)$ and $i''(V)$ in one of the device's ends with a diameter of $D = 8,2 \cdot 10^{-2}$ m, the number of electrons in $N = 24$ a probe with a mechanism for movement mounted.

After measuring $i(V)$ and $i''(V)$ after every $15 \cdot 10^{-3}$ m of probe's displacement along the axis, a high identity was obtained $i(V)$ and $i''(V)$.

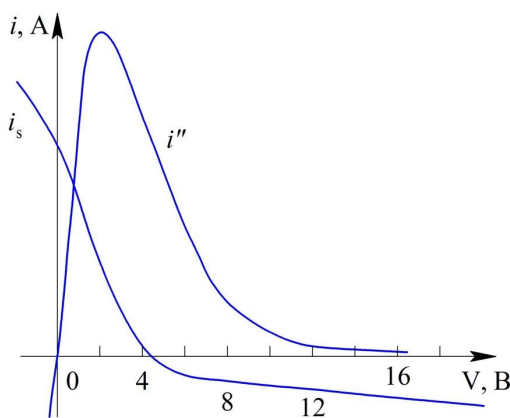


Fig. 2. An instance of determining the probe characteristics $i(V)$ and the second derivative of the probe current by voltage $i''(V)$

Function $i(V)$ was applied in a way, that one curve $i(V)$ precisely superimposed to the other one. Similarly a curve $i''(V)$ superimposed to the previous one, like it was showed at a fig. 2. Differences between these curves exceed 5%. Only in the vicinity of the bit gap ends, the curves $i(V)$ and $i''(V)$ differ from the previous, in decrease of the amplitude to complete disappearance when the probe exited from the bit gap. Processed with the help of EOM $i(V)$ and $i''(V)$, give the identical function $f_e(E)$ and according to all these, the identical parameters of plasma with the general radiation that by mentioned conditions has the following constant meanings:

$$V_{pl} = 2,1 \text{ V}; \bar{E}_e = 0,36 \text{ eV};$$

$$N_e = 3,1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}.$$

Axial probe measurements $i(V)$ та $i''(V)$ in molecular and inert gases showed the similar regularity of

plasma's parameters in accordance with the probe's movement along the device axis. The obtained experimental dependence remains unchanged by other values of the discharge current in the localized discharge too.

As a result of the fact that $V_{pl} = \text{const}$, a tension of the electric field in localized plasma in the axial direction is zero, hence, the electric field is absent and the plasma is equivalent in this direction.

Since

$$\bar{E}_e = \text{const}$$

and

$$N_e = \text{const},$$

thus, plasma in the longitudinal direction is homogeneous.

In the same device, under the same conditions as well as for the axial ones, radial studies were conducted $i(V)$ and $i''(V)$.

To do this, the device probe was soldered perpendicularly to the axis of discharged gap to the localized device in the lateral surface of the vacuum chamber. Measuring part of the probe was turned to 90° and was parallel to the device's longitudinal axis. The probe's dimensions were the same one as with axial probe measurements.

The probe holder precisely passed between the neighbour rod electrodes and with the help of a magnetic field, it was possible to move the probe within $0 \leq r \leq 50 \cdot 10^{-3}$ m so that the probe had already entered the probe tube and went beyond the limits of the discharge chamber (radius of which was $41 \cdot 10^{-3}$ m)

Placing the probe along the radius

$$r = 0,5; 10; 15; 19 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

measurements of $i(V)$ and $i''(V)$ were superimposed on one another, as it is showed on fig. 2.

After the processing of curves $i(V)$ and $i''(V)$ on ECM, plane parameters had similar values as for axial measurements:

$$V_{pl} = 2,1 \text{ V}; \bar{E}_e = 0,36 \text{ eV};$$

$$N_e = 3,25 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}.$$

Due to the fact that the plasma of a localized discharge is formed by the large number of identical negative radiations addition under the influence of complicated conditions, its outer surface is surrounded by a non-uniform electric field under the radius formed by a system of rod anodes and alternating cathodes. As a result, some of the individual parts of the plasma adjoin the space, which contains a strong electric field. Other gaps in this plasma are bordered by space with a weak electric field. According to the theoretical studies presented in [14-16], a stream of fast electrons is formed in

the dark cortex space, which creates new ions in the process of ionization, and in the excitation processes - resonance radiation during the entrance to the plasma. It should be noted that this is not happening on the border with the faraday space.

Therefore, it is logical to assume that at some intervals of plasma of general radiation that are situated in front of the rod cathodes such plasma parameters as V_{pl} , \bar{E}_e , and N_e , can differ from similar parameters in the plasma regions that are located in front of the rod anodes. Then, while moving in a circle with a radius smaller than the radius of plasma, there may be azimuthal heterogeneity. In order to detect such heterogeneity, a study of plasma of a localized discharge by azimuthal probe was conducted.

The most significant manifestation of azimuthal heterogeneity will be in the case when the largest central angle ϕ is located between the core electrodes of a localized device.

Then the second S of a radius r , during which the azimuthal probe will move, is equal to $S = r\phi$. Since $\phi = 2\pi/N$, so when $r = R$, we have $S = R \cdot 2\pi/N$. Hence, azimuthal heterogeneity is easier to find in such a localized device in which the bit gap has large radius S and a smaller number of core electrodes N .

However, during extremely small N and large R , a restriction that leads to the fact that a localized plasma may not be created due to the disappearance of complicated discharge conditions, especially for large gas pressures is imposed. This follows from expression (4.9) when $p = d_0 p_0 / S$, and should be $pS < p_0 d_0$.

Thus, the most optimal geometry of a discharge gap corresponds to a device with a diameter of $D = 4,6 \cdot 10^{-2}$ m and $N = 16$ as one variant and $N = 10$ in another one. In a case when $N = 16$, a central angle $\phi = 22,5^\circ$, when $N = 10$ - this angle is $\phi = 36^\circ$.

Since all the anodes and cathodes are identical, the determination of azimuthal heterogeneity during probe measurements is sufficient in one sector between adjacent electrodes (anode and cathode). With this purpose, the measurement of the probe characteristics $i(V)$ and the second derivative $i''(V)$ was carried out in three positions of the azimuthal probe:

- 1 – oppositely to the anode (A),
- 2 - inside the anode and the cathode (A-K),
- 3 – oppositely to the cathode (K). The position of the probe in the first variant was changed through $11,25^\circ$, and in the second through 18° .

Azimuthal measurements were carried out in the following sequence. Initially, under the constant discharge regime, determined pressure, the nature of the gas and power supply, the dependence $i(V)$ and $i''(V)$ at different positions of the probe were removed. Then

the measurements of $i(V)$ and $i''(V)$ were performed at different discharge modes, radiuses of azimuthal probe, pressure and in different gases.

Azimuthal measurements were carried out in a localized device with a diameter of $D = 4,6 \cdot 10^{-2}$ m, a length of 0,128 m and the number of electrodes $N = 16$, and showed the following results of current $I = 2 \cdot 10^{-2}$ A, dependence curves $i(V)$ and $i''(V)$ were recorded according to the above-mentioned methods of experimental probe measurements in three positions of azimuthal probe A, A-K and K through $11,25^\circ$. All three curves $i(V)$ were superimposed on each other with a slight disagreement within the measurement error. Curves $i''(V)$ were coincided with each other. As a consequence, azimuthal heterogeneity was not observed in this device.

The possible cause is in a small central angle's value between the electrodes that formed $22,5^\circ$.

During the further search of the azimuthal heterogeneity, the curves $i(V)$ and $i''(V)$ were determined depending on the discharge mode (within $1 \cdot 10^{-2}$ A - $8 \cdot 10^{-2}$ A), the pressure and the nature of gas in the interval 10-82 Pa of neon, argon and nitrogen. Here the dependence of $i(V)$ was determined for the three positions of the probe A, A-K and K of one curve. Measurements with a variable radius of the azimuthal probe yielded similar results.

The curves $i''(V)$ processed on the computer showed the same characteristic properties of the plasma of a localized discharge, which were established with axial and radial probe measurements.

As a result of probe measurements, the absence of azimuthal heterogeneity is established.

It should be noted that this experimental fact confirms the complete homogeneity of the plasma of a localized discharge. The assumption of plasma's azimuthal inhomogeneity, which was supposed to arise under the action of discrete streams of fast electrons from the side of the rod cathodes, was not confirmed.

Conclusions

1. According to the probe researches that were carried out in the plasma of localized discharge in various directions, the fact that localized plasma is homogeneous and equipotential was set.

2. In a localized plasma, a function of electrons' distribution by energies $f_e(E)$ in the regions of small energies is insignificantly differ from Maxwell distribution $f_m(E)$, but by $E_e > 6-8$ eV has an excess of fast electrons. Such excess of electrons is significantly bigger than in $f_{nv}(E)$ of ordinary plasma with negative radiation

Since localized plasma is a protracted plasma radiation column with high intensity, its utilizing in the

vicinity of SC's antenna compartment is expedient and desirable to create some reliable communication channels through a high-temperature ionized external environment.

References

1. Shefer O. V. Formuvannia zavadostiikoho kanalu zviazku iz kosmichnym aparatom shliakhom znyzhennia shchilnosti plazmy udarnoi khvyli [Noise immunity communication channel with the spacecraft formation by reducing the plasma density shock wave] *Naukovotekhnichnyi zhurnal «Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy»*. Kharkiv: KhNUPS im. Ivana Kozheduba, 2017, no 2 (27), pp.131-134. (In Ukrainian).
2. Hynzburh V. L. Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme [The propagation of electromagnetic waves in a plasma]. Moscow, Nauka, 1967. P. 684. (In Russian).
3. Shefer O. V. Optimisation of satellite telecommunication systems due to the space craft orbit injection / O. V. Shefer // *The Scientific Journal "Electronics and control systems"*. Kyiv, National Aviation University Publ., 2017, no. 1 (51), pp. 21-28.
4. Demydov V. Y., Kolokolov N. B., Kudriavtsev A. A. Zondovye metody issledovaniya nyzkotemperaturnoi plazmy [Probe methods for studying low-temperature plasma]. Moscow, Enerhoatomyzdat Publ., 1996. P. 235. (In Russian).
5. Ovsianynkov A.A., Enhelsht V.A., Lebedev Yu.A. Dyahnostyka nyzkotemperaturnoi plazmy [Diagnosis of low-temperature plasma]. Novosybyrsk: Nauka Publ., 1994. P. 483. (In Russian).
6. Chan P., Talbot L., Turian K. Elektricheskie zondy v nepodvizhnoi i dvizhushcheisya plazme [Electric probe in stationary and moving plasma]. Moscow, Mir Publ., 1978. P. 197. (In Russian).
7. Lebedev Yu.A. Elektricheskiye zondy v plazme ponyzhennoho davleniya [Electrical probes in low-pressure plasma] Moscow, Instytut neftekhymycheskoho synteza im. A.V.Topchyeva RAN. 2003. P. 26. (In Russian).
8. Sternovsky Z. and Robertson S., *Physics Plasmas*. 11, 3610 (2004).
9. Mustafaev A. S. Funktsiya raspredeleniya elektronov v anizotropnoi plazme [The electron distribution function in anisotropic plasma] *Natsyonalniy myneralno-syrevoi unyversytet «Horny»*. SPb Publ., 2013. P. 135. (In Russian).
10. H. Korn, T. Korn. Spravochnyk po matematyke (dlia nauchnykh robotnykov i inzhenerov) [Handbook of Mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1974. P. 832. (In Russian).
11. Luijendijk, S. C. M., Van Eck, J. Van Eck, J. Comparison of three devices for measuring the second derivative of a Langmuir probe curve. *Physika*, 1967, 36, p.49 - 60.
12. Raizer Yu. P. Fyzyka hazovoho razriada [Physics of gas discharge]. Moscow, Intellect Publ., 2009. P. 736. (In Russian).
13. Kriukovskiy A.S., Skvortsova Yu.Y. Prymeneniye teoryi katastrof dlia opysaniya prostranstvenno-vremennoi struktury chastotno-modulirovannogo syhnala v plazme [The application of the theory of catastrophes for describing the space-time structure of a frequency-modulated signal in a plasma] *Elektromagnitnye volny i elektronnie systemy*. – 2013. – T. 18. no. 8. pp. 18-23. (In Russian).
14. Smirnov Boris M. *Theory of Gas Discharge Plasma*. Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Switzerland, 2015, P 423.
15. Hranovskiy V. L. Elektricheskyi tok v haze. Ustanovyvshyisia tok [Electric current in the gas. Steady current]. Moscow, Nauka Publ., 1971, P. 543 (In Russian).
16. Hantzsche E. Space charge sheaths with electron emission// *Proc. 21 EPS Conf. Contr. Plasma Phys., Montpellier, 1994. Pt.II, pp. 926- 929*.

Надійшла до редколегії 23.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ЗОНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОКАЛІЗОВАНОЇ ПЛАЗМИ, ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ДІЛЯНЦІ ВИВЕДЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ НА ОРБИТУ

О.В. Шефер

У статті запропоновано метод підвищення завадостійкості супутникових радіонавігаційних систем під час виведення КА на орбіту, шляхом використання нових внутрішніх характеристик локалізованої плазми, котрі виявлені шляхом зондових досліджень. Проведено дослідження потенційних осьових, радіальних та азимутальних неоднорідностей плазми. Результати досліджень спростовують припущення про наявність азимутальної неоднорідності плазми, котра повинна була виникати під дією дискретних потоків швидких електронів. Остаточо встановлено однорідність та еквіпотенціальність локалізованої штучної плазми, що дає змогу використовувати її в околі антенного відсіку КА для утворення надійних каналів зв'язку через іонізоване зовнішнє середовище.

Ключові слова: космічний апарат, плазма, завадостійкість, супутникова радіонавігаційна система, зондові вимірювання, цілісність плазми, неоднорідності.

ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ, КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА УЧАСТКЕ ВЫВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОРБИТУ

А.В. Шефер

В статье предложен метод повышения помехоустойчивости спутниковых радионавигационных систем во время выведения КА на орбиту, путем использования новых внутренних характеристик локализованной плазмы, которые выявлены путем зондовых исследований. Проведено исследование потенциальных осевых, радиальных и азимутальных неоднородностей плазмы. Результаты исследований опровергают предположение о наличии азимутальной неоднородности плазмы, которая должна была возникнуть под действием дискретных потоков быстрых электронов. Окончательно установлено однородность и эквипотенциальность локализованной искусственной плазмы, что позволяет использовать ее в зоне антенного отсека КА для образования надежных каналов связи через ионизированную внешнюю среду.

Ключевые слова: космический аппарат, плазма, помехоустойчивость, спутниковая радионавигационная система, зондовые измерения, плотность плазмы, неоднородности.

Контроль космічного та повітряного простору

УДК 004.045

Д.В. Головняк¹, В.В. Чалий¹, Т.М. Калімулін¹, Г.В. Місюк²

¹Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

²Військова частина А1451, Харків

ІНТЕГРАЦІЯ РІЗНОРІДНИХ ДЖЕРЕЛ СПОСТЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

В роботі розглянуто різномірні джерела, інформація з яких може бути використана в системі контролю повітряного простору. Основна увага приділена системі залежного кооперативного спостереження ADS-B та системі незалежного кооперативного спостереження MLAT.

Ключові слова: радіолокаційна станція, джерела спостереження, залежне спостереження, незалежне спостереження, повітряний простір, контроль повітряного простору, координати.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Відомо [1-3], що основою інформаційного забезпечення споживачів інформації системи контролю повітряного простору є системи спостереження, які поєднуються в інформаційну мережу. Процес отримання та обробки інформації все в більший мірі є автоматизованим [3]. Ефективне використання інформації від різномірних джерел спостереження може в цілому підвищити ефективність вирішення завдань в системі контролю повітряного простору.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Інформаційна модель системи спостереження повітряного простору розроблена колективом авторів під керівництвом професора Івана Івановича Обода [2, 3]. В [2, 3] розглянуто основні інформаційні потоки взаємодії функції спостереження з операційним середовищем та основні і додаткові функції під час обміну даними спостереження. Спостереження визначається як спосіб своєчасного виявлення повітряного об'єкта (ПО) та визначення його місцеположення і своєчасне надання цієї інформації користувачам системи контролю повітряного простору [3]. В [3] визначаються такі категорії спостереження:

1. Незалежне некооперативне спостереження:
 - первинні системи спостереження;
2. Незалежне кооперативне спостереження:
 - вторинні системи спостереження;
 - мультилатерация (MLAT).
3. Залежне кооперативне спостереження:
 - ADS-C;
 - ADS-B.

Мета статті – розглянути можливість інтеграції різномірних джерел інформації в системі контролю повітряного простору.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

При незалежному некооперативному спостереженні місцезнаходження ПО визначається на підставі даних вимірювань без допомоги ПО. Прикладом є система, що використовує первинні системи спостереження, яка надає дані про місцезнаходження ПО, але не ідентифікує його і не дає іншої інформації про ПО. Якщо ПО в момент часу t_c знаходиться на траєкторії польоту в точці С з координатами (x_c, y_c, z_c) . (рис. 1), то відбитий радіолокаційний сигнал приймається приймачами радіолокаційних станцій (РЛС), які розташовані в точках A_i з координатами (x_i, y_i, z_i) , $i = \overline{1, N}$, де N – загальна кількість приймачів РЛС (рис. 1). Розглянемо випадок, коли приймачі синхронізовані в часі, тобто вимірювання всіма приймачами здійснюються одночасно в момент часу t_c . В результаті спостережень на кожному з N приймачів вимірюється азимут α_i , кут місця β_i та похила дальність D_i до ПО. Маємо вибірку незалежних вимірювань або вектор спостережень, який може бути представлений у вигляді (1):

$$U = (\alpha_1, \beta_1, D_1, \alpha_2, \beta_2, D_2, \dots, \alpha_N, \beta_N, D_N)^T, \quad (1)$$

де елементи вектору спостережень можна визначити як (рис. 1):

$$\alpha_i = \arctg \frac{y_c - y_i}{x_c - x_i}, \quad (2)$$

$$\beta_i = \arctg \frac{z_c - z_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}}, \quad (3)$$

$$D_i = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}, \quad (4)$$

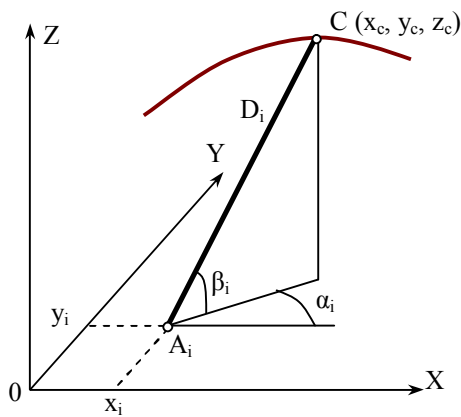


Рис. 1. Визначення елементів вектору спостережень

В результаті проведення траєкторних вимірювань визначається вектор траєкторних вимірювань $\xi = (x_c, y_c, z_c)$. При цьому помилки визначення елементів вектору ξ залежать від помилок траєкторних вимірів та можуть бути визначені з системи рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta\alpha_i \approx \left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial\alpha_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial\alpha_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \\ \Delta\beta_i \approx \left(\frac{\partial\beta_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial\beta_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial\beta_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \\ \Delta D_i \approx \left(\frac{\partial D_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial D_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial D_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \end{cases}, \quad (5)$$

При незалежному кооперативному спостереженні місцезнаходження визначається на підставі даних вимірювань, які виконуються підсистемою локального спостереження з використанням повідомлень з борту ПО. Ці повідомлення можуть містити інформацію, отриману на борту ПО, тобто дані про барометричну висоту, пізнавальний індекс ПО та інше.

Мультилатерація являє собою вид незалежного кооперативного спостереження, при якому використовуються передані повітряним судном сигнали (зазвичай відповіді або самогенеровані сигнали прийомовідповідача на частоті 1090 МГц) для обчислення місцезнаходження повітряного судна. Оскільки системи MLAT можуть використовувати вже вживані в експлуатації передачі сигналів з борту повітряних суден, вони можуть розгортатися без будь-яких змін бортової інфраструктури [4].

Для обробки сигналів на землі потрібні відповідні приймальні станції і центральна станція обробки сигналів. Системи мультилатерації вже протягом тривалого часу успішно використовуються для спостереження в аеропортах. В даний час деякі системи застосовуються в більш великих районах, наприклад районах польотів за маршрутами або зонах підходу, і вони називаються системами WAM [4].

Мультилатераційна система MLAT являє собою багатопозиційну пасивну (або пасивно-активну) РЛС, що складається з декількох приймальних станцій, станції обробки та контрольного відповідача. Мультилатерація або гіперболічне позиціонування – процес визначення положення, заснований на різниці в часі прибуття (Time Difference of Arrival (TDOA)) сигналу, випромінюваного об'єктом у напрямку трьох або більше приймачів.

Система MLAT передбачає виявлення сигналів прийомовідповідача повітряного судна поруч приймальних станцій. У системах MLAT використовується метод TDOA для встановлення поверхонь, що представляють постійну різницю відстаней між ціллю та парами приймальних станцій. Місцезнаходження повітряного судна визначає точка перетину таких поверхонь.

Теоретично мультилатерація може виконуватися з використанням будь-яких сигналів, періодично переданих з борту повітряного судна. Однак системи, використовувані для цивільних цілей, засновані тільки на сигналах прийомовідповідачів. Система MLAT вимагає наявності, не менше, чотирьох прийомних станцій для розрахунку місцезнаходження повітряного судна. Якщо відома барометрична висота повітряного судна, то місцезнаходження повітряного судна можна визначити за наявності трьох приймаючих станцій. Проте на практиці системи MLAT використовують набагато більше приймаючих станцій для забезпечення адекватних характеристик і зони дії [4].

Точність MLAT не має лінійної залежності від розмірів зони дії. Вона залежить від геометричного розташування цілі щодо приймаючих станцій і точності, з якою можна визначити відносний час отримання сигналу на кожній станції. Типова архітектура системи MLAT для спостереження приведена на рис. 2.

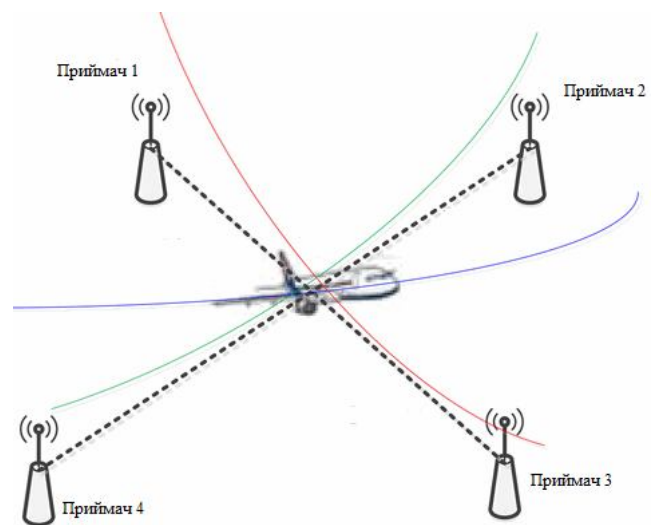


Рис. 2. Типова архітектура системи MLAT для спостереження

Система MLAT повинна використовувати єдиний опорний час для визначення відносного часу надходження сигналу на приймаючій станції. Зазвичай це робиться одним із двох способів:

- усі отримані сигнали направляються в центральну станцію обробки для отримання часової позначки по загальним часам. У цьому випадку система повинна обчислити час проходження повідомлення між кожною приймаючою станцією і центральною станцією і ввести відповідні корективи. Система передає повідомлення між центральною та приймаючими станціями для контролю і коректування часу проходження;

- годинник на всіх приймачах синхронізують за загальним опорним часом (наприклад, по GNSS) або з використанням передавача у відомому місці. Відстань між таким передавачем та приймаючими станціями відома, так що за допомогою відстеження часу надходження сигналів від цього передавача на кожну приймаючу станцію можна вносити корективи в цілях підтримки синхронізації годин приймачів.

Системи MLAT можуть обробляти сигнали ES двома способами:

- шляхом використання TDOA, як і з іншими сигналами прийомовідповідача;

- шляхом декодування повідомлення для визначення місцезнаходження (широти і довготи) повітряного судна, барометричної висоти і швидкості.

Системи мультілатерації можуть використовуватися для спостереження за рухом на поверхні аеропорту, в зоні аеродрому і при польоті по маршруту. Її застосування для спостереження за рухом на поверхні залежить від того, чи працюють бортові прийомовідповідачі на землі. На багатьох повітряних судах робота прийомовідповідачів контролюється датчиком обтиску стійок, також має назву перемікачем датчика. Приймівідповідачі режиму S продовжують передавати самогенеровані сигнали і можуть отримувати селективні запити, перебуваючи на землі. Однак часто прийомовідповідачам режиму A/C забороняють відповідати на запити під час знаходження повітряного судна на землі, щоб зменшити перешкоди для розташованих поблизу радіолокаційних систем.

Система MLAT складається з декількох антен, які приймають сигнал від повітряного судна, і центрального процесора, що обчислює розташування повітряного судна за значеннями TDOA сигналу на різних антенах. Математично TDOA між двома антенами відповідає гіперболоїду (у трьох координатах простору), на якому знаходиться повітряне судно. У тому випадку, коли сигнал повітряного судна приймають чотири антени, можна визначити три координати місцезнаходження повітряного судна, розрахувавши перетин результуючих гіпербол.

Коли є тільки три антени, три координати місцезнаходження неможливо визначити безпосеред-

ньо, однак, якщо з іншого джерела (наприклад, за даними режиму C або при знаходженні повітряного судна на землі) відома його абсолютна висота, то можна розрахувати місцезнаходження повітряного судна. Така ситуація звичайно називається як двомірне рішення. Слід зазначити, що використання барометричної абсолютної висоти (режим C) може стати причиною менш точного розрахунку місцезнаходження ПО, оскільки барометрична абсолютна висота може значно відрізнятись від геометричної відносної висоти [4].

При наявності більш ніж чотирьох антен, додаткова інформація може використовуватися або для перевірки правильності інших вимірів, або для розрахунку середнього місцезнаходження по всіх вимірах, яке повинно мати меншу сумарну похибку. Приведений на рис. 3 приклад пояснює даний принцип [4]. Показана система WAM, що включає п'ять прийомних станцій (з номерами 0-4).

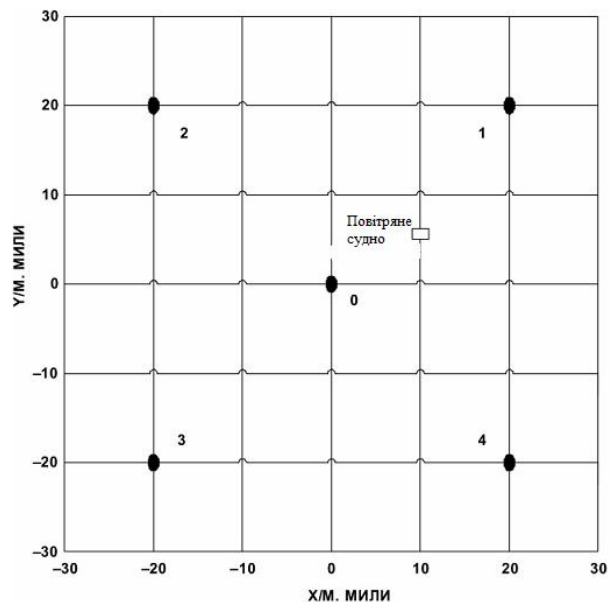


Рис. 3. Типова архітектура системи MLAT для спостереження [4]

Таким чином, MLAT є перехідним етапом до системи, в рамках якої більшість повітряних суден будуть обладнані засобами ADS-B [4].

При залежному кооперативному спостереженні місцезнаходження визначається на борту ПО, і ця інформація передається підсистемі локального спостереження поряд з можливими додатковими даними, використовуючи як свої засоби передавання інформації, так і супутникові канали передачі інформації.

У теперішній час перспективними вважаються засоби спостереження, що засновані на принципах незалежного кооперативного спостереження (наприклад, SSR), залежного кооперативного спостереження (ADS, MLAT ACAS) або на комбінації двох цих технологій (A-SMGCS) [3].

Як показує досвід, інтеграція різномірних джерел спостереження за повітряним простором є основним напрямком удосконалення національних та європейських систем контролю повітряного простору [5].

Так, використання технології кооперативного спостереження ADS-B дозволяє значно збільшити обсяг доступної для прийняття рішення інформації при виявленні ПО [5].

ПО, що оснащені системою ADS-B, автоматично направляють на наземну станцію повідомлення, що містять дані спостереження. Основні елементи даних у повідомленнях, що передаються в режимі радіоповідомлення, такі:

- пізнавальний індекс ПО;
- дані щодо місцеположення;
- вектор швидкості;
- барометрична висота;
- стан, індикатори аварійної ситуації і спеціальний індикатор місцеположення.

Дані щодо місцеположення та векторі стану ПО, що передаються по лінії передачі даних системи ADS-B, можуть представлятися:

- елементом бортової навігаційної системи, яка визначає місцеположення, як правило, бортова система управління польотом, що забезпечує зональну навігацію;

- окремим датчиком – приймачем глобальної навігаційної супутникової системи.

Використання інформації від системи ADS-B дозволить суттєво підвищити точність виміру координат та отримати додаткові дані (тип ПО, реєстраційний номер, країну реєстрації, власника ПО, позивний). Так, колективом вчених під керівництвом професора Сергія Петровича Лещенка подальшим напрямком удосконалення процедур збору, обробки та відображення інформації про повітряну обстановку, які реалізовані в системі «Віраж-планшет», стає використання даних від системи ADS-B, що також дозволить отримувати додаткові відомості про ПО [5].

Висновки і напрямки подальших досліджень

Таким чином, в роботі розглянуто різномірні джерела, інформація з яких може бути використана в системі контролю повітряного простору. Основна увага приділена системі залежного кооперативного спостереження ADS-B та системі незалежного кооперативного спостереження MLAT.

У подальшому необхідно провести дослідження щодо складу інформації від різномірних джерел та провести оцінку ефективності функціонування системи контролю повітряного простору з використанням додаткової інформації.

Список літератури

1. Свид І.В. Синтез структури інформаційного забезпечення споживачів інформаційними системами спостереження повітряного / І.В.Свид, А.І.Обод // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 2 (43). – С. 67–70.
2. Обод І.І. Інформаційна модель систем спостереження повітряного простору / І.І. Обод, О.О. Стрельницький, В.А. Андрусевиц. – Х.: ХНУРЕ, 2015, 2015. – 270 с.
3. Обод І.І. Інформаційна модель систем спостереження повітряного простору / І.І.Обод, О.П.Черних, В.В.Заволодько, О.Ю.Ткаченко // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 5 (142). – С. 35–37.
4. Гонца Д.І. Використання складних широкопasmових сигналів у системі мультиратерації MLAT [Електронний ресурс] / ДонНТУ. – Режим доступу: URL: <http://masters.donntu.org/2014/frt/gontsa/diss/indexu.htm> – 10.10.2017.
5. Лещенко С.П., Колесник О.М., Бейліс Л.В., Грицаєнко С.А. Шляхи створення єдиної картини повітряної обстановки для виявлення загрозливих і крихових ситуацій в повітрі. Новітні технології — для захисту повітряного простору: Тези допов. 13 наук. конф. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (Харків 12–13 квіт. 2017). Х.: ХНУПС, 2017. С. 204.

Надійшла до редколегії 15.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ИНТЕГРАЦИЯ РАЗНОРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ НАБЛЮДЕНИЯ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

Д.В. Головняк, В.В. Чалый, Т.М. Калимулин, Г.В. Мисюк

В работе рассмотрены разнородные источники, информация с которых может быть использована в системе контроля воздушного пространства. Основное внимание уделено системе зависимого наблюдения ADS-B и системе независимого кооперативного наблюдения MLAT.

Ключевые слова: радиолокационная станция, источник наблюдения, зависимое наблюдение, независимое наблюдение, воздушное пространство, контроль воздушного пространства, координаты.

INTEGRATION OF DIFFERENT SOURCES OF SURVEILLANCE IN THE AIRSPACE CONTROL SYSTEM

D.V. Golovniyak, V.V. Chalyi, T.M. Kalimulin, G.V. Misiyuk

The paper considers different sources, the information from which can be used in the airspace control system. The main attention is paid to the system of dependent surveillance ADS-B and to the system of independent cooperative observation of MLAT.

Keywords: radars, source of observation, dependent observation, independent observation, airspace, airspace control, coordinates.

УДК 521.35

В.И. Иванова

ГП «Конструкторское бюро «Южное» имени М.К. Янгеля», Днепро

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ СОЛНЦА НА ЭВОЛЮЦИЮ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНО-СИНХРОННОЙ ОРБИТЫ

Исследуется влияние гравитационного поля Солнца на изменение параметров самого широкого класса низких околоземных орбит – околокруговых солнечно-синхронных (ССО). Показано, что кроме прямого влияния гравитационного поля Солнца на движение космического аппарата (КА) по ССО, имеет место опосредованное влияние через возмущение гравитационного поля Земли (приливные явления). Причем именно для ССО влияние этих факторов носит вековой характер и поэтому их учет обязателен при долгосрочном прогнозировании движения КА. Выведены аналитические соотношения для анализа и численной оценки влияния гравитационного поля Солнца на наклонение солнечно-синхронной орбиты как функции угла ориентации ее плоскости относительно Солнца.

Ключевые слова: солнечно-синхронная орбита, гравитационное поле Солнца, местное солнечное время восходящего узла, наклонение ССО.

Введение

Объем запусков космических аппаратов (КА) на солнечно-синхронные орбиты (ССО) в настоящее время составляет ~60-70 % от общего числа запусков на низкие околоземные орбиты.

Основной функциональной особенностью невозмущенной ССО является постоянство ориентации ее плоскости относительно направления на Солнце – постоянство угла χ (рис. 1), что обеспечивается соответствующим выбором наклона в зависимости от требуемой высоты орбиты КА [5].

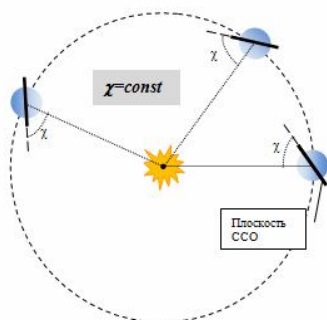


Рис. 1. К определению ССО

Для определения оптимальных начальных параметров ССО и прогнозирования их эволюции при проектировании миссий необходимы удобные для анализа соотношения влияния каждого возмущающего фактора. В теории космического полета [1],[2],[3] в полной мере разработаны модели влияния различных факторов на произвольную орбиту спутника Земли. Согласно общей теории, влияние гравитационных полей Луны и Солнца на низкие околокруговые орбиты (до 1000 км) периодически и на порядки меньше, чем от разряженной атмосферы и гравитационных аномалий Земли. Кроме того, в [3] оценено, что возмущающее ускорение от гравитационного поля Луны в среднем в 2,2 раза больше, чем ускоре-

ние от гравитационного поля Солнца. Исходя из этого, при начальном проектировании большинства миссий возмущающее влияние гравитационного поля Солнца не включается в модели движения КА. Но, как показала практика наблюдений за эволюцией параметров солнечно-синхронных орбит, такой подход является слишком грубым для формулирования и решения некоторых задач для этого класса орбит. В частности, задачи обеспечения максимальной стабильности функциональных характеристик ССО. Это и определяет актуальность исследования, основные результаты которого изложены в настоящей статье.

В статье показано, что, несмотря на малость, возмущающее влияние гравитационного поля Солнца на наклонение ССО и, соответственно, на нарушение «солнечно-синхронности», носит вековой характер, в отличие от периодического влияния гравитационного поля Луны. Откуда сделан вывод о необходимости включения модели этого влияния для любых высот ССО при оценке эволюции ССО на интервалах прогнозирования более года.

Целью исследования является вывод соотношений, удобных для анализа и получения качественных числовых оценок изменения параметров ССО под влиянием гравитационного поля Солнца - прямого и опосредованного.

В статье впервые выведены аналитические соотношения для учета влияния на эволюцию параметров ССО гравитационного поля Солнца как функции угла χ . По выведенным соотношениям получены результаты, которые подтверждены наблюдениями за движением КА «Океан-О».

Постановка задачи

Рассмотрим класс околокруговых ССО со средним радиусом r и начальными наклоном i_0 в предположении пренебрежимо малого изменения среднего радиуса орбиты от действия верхней атмосферы

(что выполняется для типовых КА на типовых орбитах - высотой более 600 км). Необходимо получить соотношения для анализа и расчета векового изменения параметров ССО под действием гравитационного поля Солнца как функции угла χ ориентации плоскости ССО относительно Солнца.

Исследование прямого влияния гравитации Солнца на параметры солнечно-синхронной орбиты

На движение спутников Земли оказывает влияние гравитационные поля всех небесных тел, но в наибольшей степени – Луны и Солнца. Причем среднее возмущающее ускорение от гравитационного поля Луны в ~2,2 раза больше, чем Солнца, но по отношению к ССО определяющее значение имеет не величина, а направление ускорения. Так как Луна с течением времени оказывается по разные стороны от плоскости ССО, влияние ее гравитационного поля носит периодический характер, без вековой составляющей. Взаимное же положение Солнца и ССО почти не меняется, что определяет хоть и малое, но вековое возмущающее воздействие гравитации Солнца.

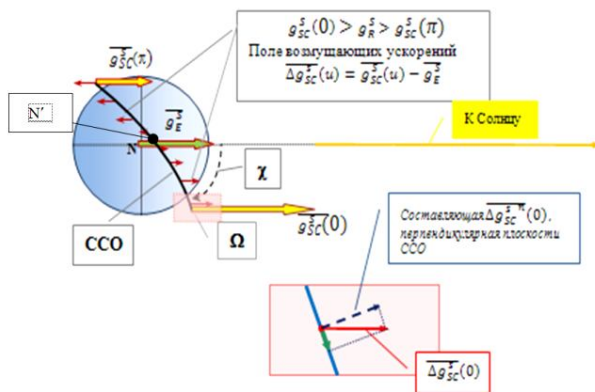


Рис. 2. Поле возмущающих орбиту ускорений от действия гравитационного поля Солнца

Рис. 2 иллюстрирует непосредственное (прямое) влияние гравитационного поля Солнца на движение КА, которое определяется разностью ускорений, сообщаемых Земле (\bar{g}_E^S) и космическому аппарату (\bar{g}_{SC}^S), проходящему в разных точках своей орбиты (u) на разных расстояниях от Солнца. На рисунке схематично в проекции на плоскость земного экватора показано поле возмущающих ускорений $\Delta \bar{g}_{SC}^S$ (маленькими стрелками) при некотором угле ориентации плоскости ССО относительно Солнца $0^\circ < \chi < 90^\circ$. Из построения на рисунке видно, что возмущающее ускорение максимально по величине и противоположно по направлению в окрестностях узлов ССО и близко к нулю в окрестностях максимально удаленных от узлов точек. При этом составляющая возмущающего ускорения в плоскости орбиты меняет знак на противоположный каждые полвитка, что вызывает только внутривитковые периодические изменения радиуса и эксцентриситета орбиты. А

составляющая, перпендикулярная плоскости орбиты (\bar{g}_{SC}^S на рис. 2), меняющая знак в максимально удаленных от узлов точках орбиты (при аргументе широты $u=90^\circ$ и 270°), означает наличие возмущающего момента. Таким образом, вектор среднего возмущающего момента \bar{M}_{cp}^S на каждом витке направлен из центра Земли вдоль линии, соединяющей самую северную и южную точки с аргументом широты $u=90^\circ$ и 270° (на точку N на рис. 2). Учитывая малость \bar{M}_{cp}^S из теоремы об изменении кинетического момента материальной точки следует, что за виток (за период обращения КА по орбите - T) плоскость орбиты развернется на малый угол вокруг оси, перпендикулярной векторам начального кинетического \bar{K} и возмущающего \bar{M}_{cp}^S моментов, то есть вокруг линии узлов орбиты КА. Иными словами, под действием возмущающего момента наклонение ССО изменится за виток на малый угол Δi^S . Причем:

$$\Delta i^S = M_{cp}^S \cdot T / K \tag{1}$$

Распишем по составляющим соотношение (1).

Согласно закону всемирного тяготения ускорение, сообщаемое гравитацией Солнца Земле:

$$g_E^S = \mu_S / \rho_0^2, \tag{2}$$

где μ_S – гравитационная постоянная Солнца, ρ_0 – среднее расстояние Земля-Солнце.

Из общих соотношений для возмущающего ускорения от гравитационного поля Солнца [1], принимая во внимание, что $i \approx 90^\circ$, получаем ускорение, сообщаемое КА в каждой точке ССО радиуса r с аргументом широты u :

$$g_{SC}^S(u) = \mu_S / (\rho_0 - r \cdot \cos u \cdot \cos \chi)^2.$$

Учитывая, что $r \cdot \cos u \cdot \cos \chi / \rho_0 \ll 1$, используя соответствующее разложение в степенной ряд и удерживая члены первого малости, получим:

$$g_{SC}^S(u) = \frac{\mu_S}{\rho_0^2} \cdot \left(1 + \frac{2r \cdot \cos u \cdot \cos \chi}{\rho_0} \right). \tag{3}$$

Из (2) и (3) следует:

$$\Delta g_{SC}^S(u) = g_{SC}^S(u) - g_E^S = 2 \cdot \mu_S \cdot r \cdot \cos u \cdot \cos \chi / \rho_0^3.$$

Из построения рис. 2 возмущающий момент для любой точки на орбите с аргументом широты u :

$$M^S(u) = \Delta g_{SC}^S(u) \cdot r \cdot \sin \chi \cdot \sin i_0 = \mu_S \cdot r^2 \cdot \cos u \cdot \sin 2\chi \cdot \sin i_0 / \rho_0^3.$$

Осредненное на витке значение возмущающего момента равно:

$$M_{cp}^S = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M^S(u) du = \frac{2 \cdot \mu_S \cdot r^2 \cdot \sin 2\chi \cdot \sin i_0}{\pi \cdot \rho_0^3}.$$

Величина кинетического момента КА, движущегося по околокруговой орбите среднего радиуса r , на витке почти постоянна и равна $K = r \cdot v = \sqrt{\mu \cdot r}$,

период обращения: $T = 2\pi/\sqrt{\mu} \cdot r^{3/2}$, где μ – гравитационная постоянная Земли. Тогда, согласно (1), под действием возмущающего момента от гравитации Солнца за виток орбитального движения КА наклонение ССО измениться на величину:

$$\Delta i^S = 4 \cdot \mu_S \cdot r^3 \cdot \sin 2\chi \cdot \sin i_0 / (\mu \cdot \rho_0^3). \quad (4)$$

Как видно из полученного соотношения (4) знак векового изменения наклонения ССО - Δi^S - определяется знаком функции $\sin 2\chi$, иными словами, для диапазонов $\chi \in (0^\circ; 90^\circ)$ и $\chi \in (180^\circ; 270^\circ)$ начальное наклонение ССО будет увеличиваться от действия гравитационного поля Солнца, в остальном диапазоне – уменьшаться. Максимальное по модулю возмущение наклонения будет наблюдаться для $\chi=45^\circ; 135^\circ; 225^\circ; 315^\circ$, то есть для ССО с местным солнечным временем восходящего узла 9 ч; 15 ч; 21 ч и 3 ч. Для орбит высотой 600-900 км максимальное отклонение наклонения от начального значения составит 12-14 угл. мин. за 5 лет функционирования КА на ССО. При $\chi=0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$ гравитационное поле Солнца не будет изменять положение плоскости ССО.

Изменение наклонения влияет на изменение скорости прецессии плоскости орбиты, следовательно, на нарушение солнечно-синхронности орбиты КА. Интегральный "вклад" приливных явлений выражается в отклонении местного солнечного времени восходящего узла. При максимальной эволюции наклонения уход местного солнечного времени за пять лет достигает примерно 70 минут, что в некоторых случаях существенно нарушает условия дистанционного зондирования Земли.

Возмущение положения плоскости солнечно-синхронной орбиты за счет приливных явлений на Земле

Согласно теории приливов уровневая поверхность шарообразного небесного тела, вследствие действия гравитации другого небесного тела вытягивается в сторону последнего и превращается в эллипсоид. Тело приобретает эллипсоидальность как меридианной, так и в экваториальной плоскости, а большая ось эллипсоида располагается в окрестности направления на притягивающий возмущающий центр. При этом если большая полуось по отношению к радиусу шара увеличивается на величину Δa , то остальные две полуоси уменьшаются на величину $\Delta a/2$, а поверхность возмущенного и невозмущенного эллипсоидов пересекаются примерно на уровне широт $54^\circ 40'$ и на таком же угловом расстоянии от большой оси эллипса в сечении, параллельном экватору (рис. 3).

Очевидно, что величина деформации уровневой поверхности Земли, а значит и возмущения ее гравитационного поля, прямо пропорциональна массе возмущающего гравитирующего тела и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него. Находясь существенно ближе к Земле, Луна вызывает более явные

приливные явления, чем Солнце, несмотря на меньшую массу. Однако, влиянием возмущения гравитационного поля Земли на движение КА по солнечно-синхронной орбите за счет притяжения Луны можно пренебречь не столько из-за его малости, сколько из-за периодичности – «вспухание» поверхности Земли будет следовать за Луной, оказываясь по разные стороны от плоскости ССО. Очевидно, что «вспухание» за счет гравитации Солнца все время будет перемещаться вместе с плоскостью ССО и, следовательно, будет направленно и постоянно возмущать ССО.

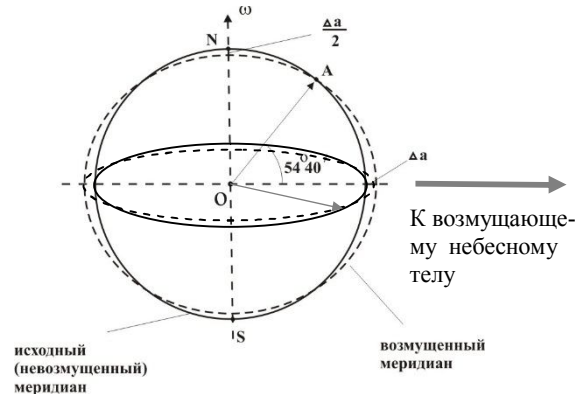


Рис. 3. Схема деформации Земли под действием гравитационного поля другого небесного тела

Таким образом, кроме непосредственного влияния гравитационное поле Солнца оказывает и опосредованное вековое влияние на движение КА по солнечно-синхронной орбите – через приливные явления на поверхности Земли. Получим приближенные аналитические соотношения для оценки величины отклоненных параметров ССО за счет этого фактора.

Примем, что Солнце находится в плоскости экватора, тогда дополнительное «вспухание» локализуется в экваториальной области. Деформациям такого рода соответствует модель гравитационного поля трехосного эллипсоида, поэтому для учета деформаций земного эллипсоида за счет солнечных приливных явлений обосновано можно использовать разложение возмущающего потенциала гравитационного поля Земли по сферическим функциям с учетом зональной и секториальной гармоник второго порядка, заменив долготу на угол χ и вычислив соответствующие коэффициенты:

$$\Delta U_{пр} (r, \phi, \chi) = (\mu/r) \cdot (r_e/r)^2 \times \left[\tilde{c}_{20} \cdot P_{20}(\sin \phi) + (\tilde{c}_{22} \cos 2\chi + \tilde{d}_{22} \sin 2\chi) P_{22}(\sin \phi) \right], \quad (5)$$

где r_e – экваториальный радиус Земли; ϕ – геоцентрическая широта точки пространства; P_{20}, P_{22} – функции Лежандра; $\tilde{c}_{20}, \tilde{c}_{22}, \tilde{d}_{22}$ – коэффициенты, учитывающие полярное и экваториальное сжатия земного эллипсоида.

Коэффициенты в разложении потенциала по сферическим функциям пропорциональны сжатию соответствующих эллипсов. В [3] коэффициент сжатия земного эллипсоида за счет солнечного прилив-

ного ефекта оцenen как $6 \cdot 10^{-8}$. Принимая во внимание, что коэффициент основного полюсного сжатия Земли $\sim 1/300$, а экваториального $\sim 1/3000$, и используя известные коэффициенты C_{20} , c_{22} , d_{22} [4], получаем коэффициенты для выражения (5):

$$\tilde{c}_{20} \approx 1,9 \cdot 10^{-8}; \tilde{c}_{22} \approx 1,03 \cdot 10^{-9}; \tilde{d}_{22} \approx 2,84 \cdot 10^{-10}.$$

Рассмотрим отдельно слагаемые выражения (5), содержащие зональные и секториальные гармоники.

Деформация земного эллипсоида в меридианных плоскостях, дающая возмущающий потенциал первого слагаемого выражения (5), влияет на параметры ССО аналогично основному сжатию Земного эллипсоида, т.е. вызывает периодическое внутривитковое изменение радиуса орбиты и вековое изменение долготы восходящего узла Ω за виток [5] (схема поля возмущающих ускорений Δg_i возмущающего момента M_{pp}^{Ω} - на рис. 4):

$$\Delta \Omega_{pp} = 3\pi \cdot (r_e/r)^2 \cdot \tilde{c}_{20} \cdot \cos i. \quad (6)$$

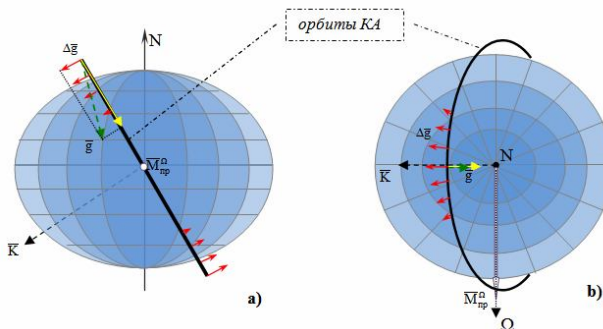


Рис. 4. Схема возмущающих орбиту КА ускорений от полюсного сжатия земного сфероида: а – в проекции на меридианную плоскость; б – в проекции на экваториальную плоскость

Таким образом, вековое изменение долготы восходящего узла не зависит от ориентации плоскости ССО относительно Солнца. В соответствии с (6) для околокруговых орбит высотой 600-900 км за 5 лет долгота сместится за счет рассматриваемого фактора не более, чем на $0,034^\circ$, что соответствует отклонению местного солнечного времени восходящего узла всего на ~ 8 секунд. Следовательно, фактор полюсного сжатия земного сфероида за счет приливных явлений от гравитации Солнца практически не влияет на нарушение солнечно-синхронности.

Экваториальная деформация земного сфероида, определяющая возмущающий потенциал второго слагаемого выражения (5), как следует из иллюстрации на рис. 5, также приводит к периодическому изменению радиуса ССО и повороту ее плоскости за счет возмущающего момента M_{pp}^i . Средний момент на витке направлен вдоль направления, близкого к линии соединения самой северной и южной точек орбиты КА (аргумент широты $u=90^\circ$ и 270°). По теореме об изменении кинетического момента под действием момента M_{pp}^i плоскость ССО будет вращаться вокруг линии узлов, то есть будет изменяться накло-

нение. В виду того, что для ССО средний на витке возмущающий момент сохраняет квазипостоянную ориентацию, это изменение носит вековой характер.

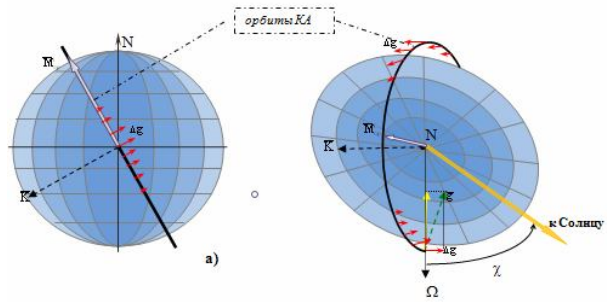


Рис. 5. Схема возмущающих орбиту КА ускорений от экваториального сжатия земного сфероида: а – в проекции на меридианную плоскость; б – в проекции на экваториальную плоскость

Для получения численных характеристик влияния на параметры ССО экваториального сжатия Земли за счет приливных явлений проанализируем выражение для возмущающего потенциала гравитационного поля Земли – второе слагаемое в (5):

$$\Delta U_{pp}^{22}(r, \phi, \chi) = (\mu/r) \cdot (r_e/r)^2 \times \times (\tilde{c}_{22} \cos 2\chi + \tilde{d}_{22} \sin 2\chi) \cdot P_{22}(\sin \phi),$$

Перпендикулярная плоскости орбиты КА составляющая возмущающего ускорения:

$$\Delta g_{pp}^w = \Delta g_m \frac{\cos i}{\cos \phi} - \Delta g_\chi \frac{\sin i \cdot \cos u}{\cos \phi},$$

где частные производные вдоль меридиана и параллели, соответственно:

$$\Delta g_m = \frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta U_{pp}^{22})}{\partial \phi}, \quad \Delta g_\chi = \frac{1}{r \cdot \cos \phi} \frac{\partial(\Delta U_{pp}^{22})}{\partial \chi}.$$

При наклонении близком 90° первое слагаемое в виду его малости можно отбросить, тогда:

$$\Delta g_{pp}^w = -\frac{\sin i \cdot \cos u}{r \cdot \cos^2 \phi} \cdot \frac{\partial(\Delta U_{pp}^{22})}{\partial \chi}, \quad P_{22}(\sin \phi) = 3 \cos^2 \phi,$$

следовательно, при фиксированном χ :

$$\frac{\partial(\Delta U_{pp}^{22})}{\partial \chi} = \frac{6\mu}{r} \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 \cdot (-\tilde{c}_{22} \sin 2\chi + \tilde{d}_{22} \cos 2\chi) \cdot \cos^2 \phi$$

Учитывая, что при наклонении близком 90° для околокруговых орбит $u \approx \phi$, получаем:

$$\Delta g_{pp}^w = \frac{6\mu}{r^2} \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 \cdot \sin i \cdot (\tilde{c}_{22} \sin 2\chi - \tilde{d}_{22} \cos 2\chi) \cdot \cos u.$$

Следовательно, среднее на витке значение возмущающего момента:

$$M_{cp}^{pp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Delta g_{pp}^w(u) \cdot r \cos u \cdot du.$$

или после преобразования:

$$M_{cp}^{pp} = \frac{6\mu}{r} \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 \cdot \sin i \cdot (\tilde{c}_{22} \sin 2\chi - \tilde{d}_{22} \cos 2\chi),$$

откуда, согласно (1), под действием приливного возмущения гравитационного поля Земли от гравитации Солнца наклонение ССО измениться за виток:

$$\Delta i^{\text{пр}} = \frac{M_{\text{сп}}^{\text{пр}} \cdot T}{K} \approx \frac{37,7 \Gamma e^2}{r^2} \cdot (\tilde{c}_{22} \sin 2\chi - \tilde{d}_{22} \cos 2\chi). \quad (7)$$

В соответствии с полученным соотношением (6), к концу пятилетнего срока функционирования КА максимальное изменение наклона ССО составит ~ 3 угловых минут (для высоты орбиты 600 км). Отклонение местного солнечного времени восходящего узла только за счет этого фактора на пятилетнем интервале может достигать 20 минут, поэтому для задач точного прогнозирования эволюции ССО этим фактором пренебрегать нельзя.

Выводы

1. В силу неизменной ориентации плоскости солнечно-синхронных орбит КА относительно направления Земля-Солнце гравитационное поле Солнца оказывает постоянное направленное влияние на эволюцию параметров этих орбит.

2. Влияние гравитации Солнца выражается как в прямом возмущении движения КА по ССО, так и опосредованном - через возмущение гравитационного поля Земли (приливный эффект). Причем как прямое, так и опосредованное влияние преимущественно выражается в вековом изменении наклона ССО, что на длительных временных интервалах приводит к нарушению солнечно-синхронности.

3. Полученные аналитические соотношения (5), (6), (7) представляют собой удобные для анализа и расчета зависимости векового изменения наклона и долготы восходящего узла от ориентации ССО относительно Солнца (угла χ).

4. С использованием соотношения (6) показано, что изменение долготы восходящего узла за счет приливных явлений пренебрежимо мало и может не

учитываться при решении задачи обеспечения максимальной стабильности ССО.

5. На основе соотношений (5) и (6) получено, что максимальное изменение наклона от прямого влияния гравитационного поля Солнца для орбит высотой 600-900 км составляет 12-14 угл. мин., Возмущение от приливных явлений примерно в 4 раза меньше, но для задач точного прогнозирования эволюции ССО необходимо учитывать оба эти фактора.

6. В дальнейшем необходимо исследовать особенности влияния на параметры ССО светового давления.

Список литературы

1. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета ИСЗ. – М.: Наука, 1965.-540 с.
2. Vallado, D. A. *Fundamental of Astrodynamics and Applications*, vol. 2, McGraw-Hill, NewYork, 2001.
3. Сурдин В.Г. Пятая сила: - М. Библиотека «Математическое просвещение», 2002 – 40с.
4. Евтушенко Е.Г. Движение ИСЗ в гравитационном поле Земли, М. ВЦ АН СССР 1967 – 140 с.
5. Приложение теоремы об изменении кинетического момента к задаче о вековом движении плоскости солнечносинхронной орбиты/ А.Д. Шенгун, В.И. Иванова, И.В. Маштак // *Ракетная техника и вооружение.* – 2013 – №2 – С. 35-40.
6. Чернов, А.А., Чернявский, Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения [Текст]/ А.А. Чернов, Г.М. Чернявский - М.: Радио и связь, 2004. - 200 с.
7. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли, М., Физматгиз, 1963 г.
8. Митропольский Ю.А. Метод усреднения в нелинейной механике: - Киев, Наукова думка, 1971. – 440 с.
9. Пантелеев В.Л. Физика Земли и планет, курс лекций, МГУ, 2001

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук В.Ф. Фролов, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ СОНЦЯ НА ЕВОЛЮЦІЮ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНО-СИНХРОННОЇ ОРБИТИ

В.І. Иванова

Досліджуються вплив гравітаційного поля Сонця на зміну параметрів самого широкого класу низьких навколосонячних орбіт – навколокругових сонячно-синхронних (ССО). Показано, що крім прямого впливу гравітаційного поля Сонця на рух космічного апарату (КА) по ССО, має місце опосередкований вплив через обурення гравітаційного поля Землі (приливні явища). Причому саме для ССО вплив цих факторів носить віковий характер і тому їх врахування обов'язкове при довгостроковому прогнозуванні руху КА. Виведено аналітичні співвідношення для аналізу і чисельної оцінки впливу гравітаційного поля Сонця на нахил сонячно-синхронної орбіти як функції кута орієнтації її площини відносно Сонця.

Ключові слова: сонячно-синхронна орбіта, гравітаційне поле Сонця, місцевий сонячний час висхідного вузла, нахил ССО.

FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE GRAVITATION FIELD OF THE SUN ON THE EVOLUTION OF SUNNY-SYNCHRON ORBIT PARAMETERS

V.I. Ivanova

The influence of the gravitational field of the Sun on the change in the parameters of the broadest class of low Earth-orbit - solar-synchronous orbits (SSO) is investigated. It is shown that in addition to the direct influence of the gravitational field of the Sun on the motion of the spacecraft (SC) on the SSO, there is an indirect effect through the perturbation of the gravitational field of the Earth (tidal phenomena). Moreover, it is precisely for the SSO that the influence of these factors is of an age-old nature and therefore their account is obligatory for long-term forecasting of the movement of the spacecraft. The analytical relations for analyzing and numerical estimation of the influence of the gravitational field of the Sun on the inclination of the solar-synchronous orbit as a function of the angle of orientation of its plane relative to the Sun are derived.

Keywords: solar-synchronous orbit, gravitational field of the sun, local solar time of the ascending node, inclination of the SSO.

Радіолокація і радіотехніка

УДК.621.396.62.33

И.В. Барышев, К.А. Щербина, М.А. Вонсович, Е.П. Мсаллам

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФИЛЬТРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА МОДУЛИРОВАННЫМ ФИЛЬТРОМ

Синтезирована схема модулированного фильтра с самосинфазированием для следающего приема и обработки частотно модулированного сигнала на основе имитационного моделирования. Приведены результаты тестирования имитационной модели, подтверждающие высокую достоверность эффективной работы схемы при заданных исходных данных. Сравнительный анализ схем следающего модулированного фильтра с самосинфазированием и следающего измерителя с перестраиваемым гетеродином и узкополосным фильтром в петле автоподстройки показал, что разработанная схема обладает простотой технической реализации и улучшенной помехоустойчивостью.

Ключевые слова: следающий доплеровский фильтр, фильтрация, модулированный фильтр, показатели качества, следающий прием, частота.

Введение

Общая тенденция дальнейшего совершенствования и развития радиотехнических систем автономной навигации связана с расширением круга целевых задач и ужесточением требований к показателям точности измерений скоростных параметров движущегося объекта по результатам приема и обработки частотно-модулированного сигнала, формируемого отражающей поверхностью самой различной физической природы [1, 2].

Действенным методом повышения энергетики измерительного канала, является ограничение полосы пропускания фильтра доплеровских частот до ширины спектра входного ЧМ-сигнала, или даже до части ширины этого спектра.

При этом сам следающий доплеровский фильтр может быть реализован на основе схемы следающего гетеродина, следающих схем частотной или фазовой автоподстройки частоты (ЧАП или ФАПЧ), а также по так называемым комбинированным схемам [3, 4].

Общим недостатком следающих схем ЧАП, ФАПЧ и комбинированных схем является невозможность выделения (фильтрации) спектра доплеровского сигнала, который дает более точную оценку средней доплеровской частоты F_d^* при выполнении вычислительных операций, например, методом квазиоптимальной обработки потока нулевых переходов, формируемых из спектра ΔF_d [5].

Перспективные системы следающего приема и обработки, обеспечивающие выделение и обработку доплеровского сигнала, рассмотрены в [6]. Данный

класс этих систем реализован на основе применения модулированного фильтра (МФ) с самосинфазированием (СМФС). Общие вопросы теоретических основ построения таких фильтров рассмотрены в [7-9] применительно к приему и обработке широкополосных частотно-модулированных (ЧМ) сигналов в связных и телеметрических радиосистемах.

Отличительной особенностью СМФС является то, что он обрабатывает внутреннюю структуру спектра ЧМ сигнала, улучшая тем самым энергетику измерительного канала по сравнению с каналом в котором применяется фиксированное ограничение доплеровского спектра. Однако фильтрующие свойства СМФС применительно к внутриспектральной обработке доплеровского сигнала, отражаемого подстилающей поверхностью, что это имеет место в автономных системах навигации подвижных объектов, практически не исследованы.

Наиболее перспективным направлением исследования фильтрующих свойств СМФС является имитационное моделирование фильтра в составе следающего приема и обработки доплеровского сигнала по средней частоте его доплеровского спектра F_d^* .

Цель статьи: синтез следающего модулированного фильтра с самосинфазированием в среде имитационного моделирования динамических систем для следающего приема и обработки доплеровского ЧМ сигнала, отражаемого подстилающей поверхностью.

Теоретическая часть

Выбор показателя качества фильтрации следающего модулированного фильтра с самосинфазирова-

нием и методика его оценки по спектральным измерениям.

Из приведенного [10, 11] упрощенного рассмотрения следящего МФ с самосинфазированием следует, что основным показателем качества работы СМФС является помехоустойчивость приема ЧМ сигнала, зависящая от соотношения шумовой полосы резонансного тракта приемника до частотного дискриминатора в надпороговой области.

Как следует из теории СМФС, как системы с замкнутой петлей управления [10], основой оценки помехоустойчивости МФС, а следовательно, и СМФС является эквивалентная частотная характеристика (ЭЧХ) управляемого контура

$$K_{\Sigma}(j\Omega) = 1 / \left(1 + (j\Omega / \Delta\omega_{\Sigma\Phi}) \cdot [1 - K_{\Sigma}(j\Omega)] \right). \quad (1)$$

ЭЧХ дает возможность рассчитать частотные искажения ЧМ сигнал и нелинейные искажения модулирующей функции.

Воспользуемся на формальном уровне таким же определением качества работы, а именно, фильтрации СМФС как и для обычного ЧМ приемника с той лишь разницей, что соответствующие соотношения сигнал/шум по мощности будем оценивать (измерять) на входе и выходе МФ считая, что центральная частота, настройки МФ является постоянной величиной $f_{0,МФ} = \omega_{Д}^* / (2\pi)$, а полоса пропускания $\Delta\omega_{\Sigma\Phi} \geq \Delta\omega_{Д}$.

Запишем выражение для оценки качества фильтрации спектра (т.е. качества работы МФ) доплеровского сигнала при наличии шума

$$A = \left(\bar{P}_{С.ВЫХ} / \bar{P}_{Ш.ВЫХ} \right) / \left(\bar{P}_{С.ВХ} / \bar{P}_{Ш.ВХ} \right), \quad (2)$$

где $\bar{P}_{С.ВЫХ}$, $\bar{P}_{С.ВХ}$ – средние значения мощностей сигнала на выходе и входе МФ; $\bar{P}_{Ш.ВЫХ}$, $\bar{P}_{Ш.ВХ}$ – средние значения мощности шума на выходе и входе МФ. Черта сверху означает усреднение по спектральным компонентам ЧМ сигнала и шума.

Из теории спектрального анализа [10] известно, что средняя мощность сигнала $x(t)$, прошедшего узкополосный фильтр F (по предположению идеальный) с полосой пропускания $\Delta\omega$, центральной частотой ω_0 и коэффициентом усиления внутри полосы $(\omega_0 - \Delta\omega/2, \omega_0 + \Delta\omega/2)$ равным 1, будет определяться выражением

$$\bar{P}_{С.ВЫХ} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x_F(t)|^2 dt. \quad (3)$$

Так как фильтр пропускает только часть спектра сигнала, заключенную в полосе $\Delta\omega$, то средняя мощность сигнала на выходе

$$\bar{P}_{С.ВЫХ} = \int_{\omega_0 - \Delta\omega/2}^{\omega_0 + \Delta\omega/2} S_x(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Величина $S_x(\omega)$, входящая в (4), – спектральная плотность. Сравнивая (3) и (4) получим

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x_F(t)|^2 dt = \bar{P}_{С.ВЫХ}. \quad (5)$$

Для определения $S_x(\omega)$ нужно устремить $\Delta\omega \rightarrow 0$. Но это означает, что на выходе фильтра будет очень слабый сигнал, который трудно измерить (кроме случая при котором спектр содержит дискретную компоненту)

На практике для вычисления $\bar{P}_{С.ВЫХ}$, $\bar{P}_{С.ВХ}$ нужен спектроанализатор, вычисляющий спектры сигнала и шума на входе и выходе МФ в заданной полосе частот $(\omega_0 - \Delta\omega/2, \omega_0 + \Delta\omega/2)$. Далее нужно выполнить возведение в квадрат и усреднение по количеству M вычисленных значений. Тогда

$$\bar{P}_C = \frac{1}{M} \sum_{q=1}^M S_q^2(m); \text{ мВт/Гц.} \quad (6)$$

Величина M выбирается в виде степени числа M . Обычно не более $M = 1024$ для цифровых спектроанализаторов.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования фильтрующих свойств СМФС выполнялись на основе цифровой имитационной модели фильтра, синтезированной в среде имитационного моделирования динамических систем на основе использования функциональной схемы. Детальное описание динамической модели СМФС приведено в [11].

В составе имитационной модели СМФС содержится источник модулирующего сигнала, который обеспечивал формирование модулирующей функции Ω в виде низкочастотной гармонической функции вида $\lambda_{\Omega}(t) \approx \sin \Omega t$ и случайной моделирующей функции без учета коэффициента корреляции амплитудных флуктуаций ЧМ сигнала.

Генератор шума имитировал «белый» шум $n(t)$ с заданной спектральной плотностью N_0 и корреляционной функцией $K(\tau) = N_0 \delta(\tau) / 2$ в виде случайных чисел с нормальным распределением.

Контроль спектра ЧМ сигнала на входе и выходе МФ осуществлялся встроенным в имитационную модель цифровым спектроанализатором.

Остальные элементы имитационной модели СМФС выполнены на основе стандартных цифровых блоков с известной программной реализацией (модулятор ЧМ сигнала, сумматоры, ФНЧ фильтры, блоки сохранения данных и т.д.).

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 1-3. На рис. 3 жирной линией

нанесена условно спектральная линия S^2 на частоте 10 кГц, соответствующая $\delta(f)$ для $f_0 = 10$ кГц.

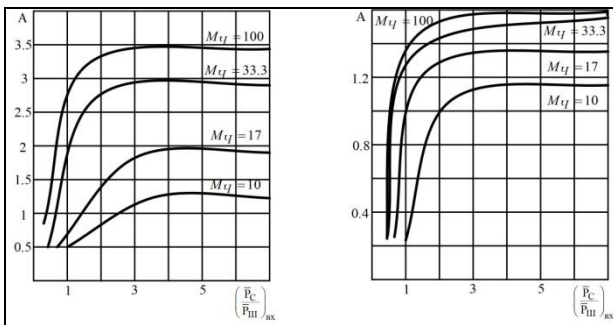


Рис. 1. Зависимость коэффициента фильтрации от $(P_C / P_{Ш})_{вх}$ при: а – гармонической модулирующей функции $\lambda_{ч}(t)$; б – случайной модулирующей функции $\lambda_{ч}(t)$

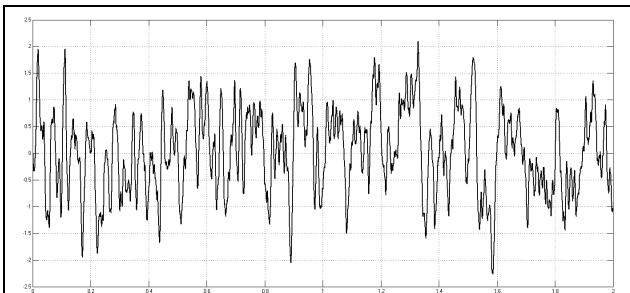


Рис. 2. Вид случайной модулирующей функции ЧМ сигнала при частоте среза ФНЧ $F_M = \Omega/2\pi = 30$ Гц

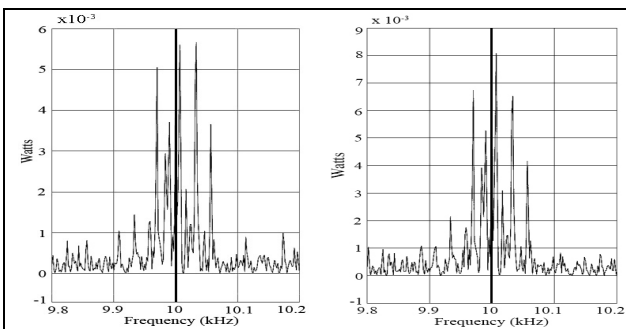


Рис. 3. Спектр ЧМ сигнала $S^2(t)$ на входе а) и выходе б) модулированного фильтра при $(P_C / P_{Ш})_{вх} = 14$ и $\beta = \pm 100$ Гц

Исходные данные моделирования:

$F_0 = F_D^* = 10$ кГц – резонансная частота МФ (эквивалентна $W_{П}^* \approx 900$ км/ч);

$\Delta F = \Delta F_D^* = 1$ кГц – ширина полосы пропускания МФ;

$F_M = \Omega/(2\pi)$ – гармоническая и характеристическая частота модулирующей функции равнялась $10 \div 100$ Гц;

полоса УНЧ составляла $0 \div 200$ Гц с дискретами 10, 30, 60, 90, 100 Гц;

девиация частоты ЧМ модулятора составляла ± 500 Гц и ± 100 Гц;

индекс частотной модуляции $M_{ч} = \Delta F/F_M$ составлял 10, 30, 17, 11, 10;

спектральная плотность мощности шума $N_0 = 5 \cdot 10^{-5} \div 100 \cdot 10^{-5}$ Вт/Гц.

Приведены экспериментальные исследования комбинированной системы ЧАП, реализованной на модулированном фильтре с самосинфазированием. Экспериментальные исследования выполнены с применением цифровой имитационной модели в среде имитационного моделирования динамических систем. При заданных исходных данных коэффициент фильтрации помехи (выигрыш) в отношении сигнал/шум на выходе по отношению сигнал/шум на входе в зависимости от параметров модулирующей функции и индексу частотной модуляции находился по максимуму от 1,5 до 3 раз.

Дальнейшее совершенствование комбинированных систем ЧАП, обеспечивающих согласованную обработку спектральной структуры доплеровского сигнала может идти по пути стабилизации уровня входных сигналов, подверженных паразитной амплитудной модуляции и больших диапазонах изменения отношения сигнал/шум на входе.

Заключение

В работе исследована задача оценки качества фильтрации спектра доплеровского сигнала, отраженного от подстилающей поверхности следящим модулированным фильтром.

Полагается, что в процессе зондирования подстилающей поверхности непрерывным гармоническим сигналом, происходит его преобразование в амплитудно-частотно модулированный сигнал, который принимается в виде аддитивной смеси с “белым” гауссовским шумом.

При выбранном показателе качества фильтрации спектра доплеровского сигнала СМФС, формально совпадающем с известным показателем помехоустойчивости приема ЧМ сигнала в канале передачи непрерывных сообщений, отличающимся расчетом средних мощностей сигнала и шума на входе и выходе МФ, получены следующие результаты.

Максимальное значение коэффициента фильтрации при гармонической модулирующей функции ЧМ сигнала не превышает $3 \div 3,5$ раз или примерно 5 дБ по мощности для индекса ЧМ модуляции стремящемуся к максимуму при F_D , стремящейся к минимуму.

Область пороговых значений коэффициента фильтрации примерно одинакова для различных

значення індекса модуляції ЧМ сигналу і знаходиться в межах $3 \div 5$ дБ по відношенню середніх потужностей сигналу і шуму на вході МФ, розрахованих по їх спектрам.

Аналогічні висновки можна зробити і для випадкової модулюючої функції ЧМ сигналу на вході МФ. Відмінність складає лише в тому, що максимальне значення коефіцієнта фільтрації не перевищує $1,2 \div 1,4$ раз, або приблизно $1,5$ дБ по відношенню середніх потужностей сигналу і шуму на вході МФ, розрахованих по їх спектрам.

При цьому область порогових значень коефіцієнта фільтрації для різних значень індекса модуляції знаходиться в межах $0,8 \div 1,5$ дБ по відношенню середніх потужностей сигналу і шуму на вході МФ.

Таким чином, заміна резонансних узкополосних фільтрів з фіксованими параметрами, які застосовуються в існуючих трактах прийому і обробки доплерівської інформації слідячим модульованим фільтром з самосинфазуванням для реальних умов формування модулюючої функції в формі випадкового процесу, дає покращення стійкості до $1,5 \div 2$ дБ.

Список літератури

1. V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla, M. O. Antonov and O. A. Khaleev, "Optimal acquisition mode and signal processing algorithm in synthetic aperture radar," 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kiev, 2017, pp. 511-516.
2. V. Pavlikov, V. Volosyuk, S. Zhyla, H. N. Van and K. N. Van, "A new method of multi-frequency active aperture synthesis for imaging of SAR blind zone under aerospace vehicle," 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017, pp. 118-120.
3. Печенин, В.В. Узкополосная фильтрация и измерение частоты сигналов в доплеровских системах навига-

ции летательных аппаратов / В.В. Печенин, К.А. Щербина, Ю.В. Съедина и др. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 56 с.

4. Зайцев, Г.Ф. Радиотехнические системы автоматического управления высокой точности [Текст] / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов. – К. : Техника, 1988. – 208 с.

5. Печенин, В.В. Потенциальная точность цифровой обработки фазовых измерений, маскируемых аддитивным нормальным шумом [Текст] / В.В. Печенин, А.Р. Сарамолки // Системи обробки інформації. – Вип. 3 (77). – 2009. – С. 75–78.

6. Печенин, В.В. Классы следящих систем на модульованном фильтре [Текст] / В.В. Печенин, К.А. Щербина, М.А. Вонсович // Акустические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: мат. 8-й Межд. конф., Суздаль, 20–23 сентября 2015 г. – С. 161–163.

7. Автономные радиосистемы [Текст] / А.С. Виницкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.

8. Колчинский, В.Е. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов [Текст] / В.Е. Колчинский, И.А. Мандуровский, М.И. Константиновский. – М. : Сов. радио, 1975. – 432 с.

9. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К. Комбинированные следящие системы. К.: Техника, 1978.

8. Виницкий, А.С. Модульованные фильтры и следящий ЧМ прием [Текст] / А.С. Виницкий. – М.: Советское радио, 1960. – 548 с.

10. Вонсович М.А., Синтез модульованного фильтра с самосинфазуванням для слідячого прийому і обробки частотно модульованого сигналу методом імітаційного моделювання [Текст] / М.А. Вонсович, К.А. Щербина, В.В. Печенин, Ю.В. Съедина // Радиотехніка. – Вип. 186. – Х., 2016. – С. 211-216.

11. Вонсович, М.А. Структурный синтез комбинированной системы частотно-фазовой автоподстройки частоты, совмещенной с фильтрующей схемой спектра входного сигнала [Текст] / М.А. Вонсович, К.А. Щербина, В.В. Печенин, Е.П. Мсаллам // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – № 4 (36). – С. 38-43.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. В.В. Павліков, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Харків.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ ДОПЛЕРІВСЬКОГО СИГНАЛУ МОДУЛЬОВАНИМ ФІЛЬТРОМ

І.В. Барішев, К.О. Щербина, М.А. Вонсович, Є.П. Мсаллам

Синтезовано схему модельованого фільтра з самосинфазуванням для слідуючого прийому та обробки частотно модульованого сигналу на основі імітаційного моделювання. Наведені результати тестування імітаційної моделі підтверджують високу вірогідність ефективної роботи схеми при заданих початкових даних. Порівняльний аналіз схем слідуючого модульованого фільтра з самосинфазуванням та слідуючим вимірювачем з перестроюваним гетеродіном і вузькосмуговим фільтром в петлі автопідстроювання показав, що розроблена схема володіє простотою технічної реалізації і покращеною заводстійкістю.

Ключові слова: слідуючий доплерівський фільтр, фільтрація, модульований фільтр, показники якості, слідуючий прийом, частота.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SPECTRAL QUALITY FILTRATION OF DOPPLER SIGNAL GENERATED BY UNDERLYING SURFACE

I.V. Baryshev, K. A. Shcherbina, M. A. Vonsovich, E.P. Msallam

The simulation approach has been used to synthesis the modulated filter model with self-cophasing for tracking and processing modulated signal. The high reliability of the efficient circuit performance for the given initial data has been proved by the results of the simulation model test. The comparative analysis of self-cophasing modulated tracking filter circuit and tracking meter circuit with tuned heterodyne and narrow-band filter in the locking loop has shown that the developed circuit has simple technical implementation and shows improved noise immunity.

Key words: Doppler tracking filter, filtration, modulated filter, quality indicators, tracking, frequency.

УДК 621.396.67

Н.К. Бороздин, В.П. Дорогобид, О.О. Таган

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОДНОМАЧТОВОГО НЕСИММЕТРИЧНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Рассматривается влияние заземленной мачты на электрические параметры одномастового излучателя с верхней емкостной нагрузкой. Проводится анализ двух основных разработок одномастовых антенн, антенны с нижним питанием и антенны с верхним питанием. Приведены электрические схемы разных типов несимметрических излучателей. Описаны все нагрузки, которые есть в системах. Выражения для распределения тока и напряжения в таких системах и входного сопротивления получены путем использования уравнений Пистолькорса для электрически несимметричных линий. Решение системы уравнений относительно неизвестных токов и напряжений в начале каждой линии выполнено с учетом соответствующих граничных условий. Представленные соотношения дают широкие возможности проведения численных расчетов по определению степени влияния величин радиусов проводников, расстояний между ними, значений нагрузок, их видов и мест установки на основные параметры подобных излучателей.

Ключевые слова: антенна с нижним, верхним питанием, емкостная нагрузка, электродинамическая нагрузка, электродинамическое волновое сопротивление.

Постановка проблемы

По принципу действия и построения антенны можно разделить на проволочные (или линейные, выполняемые из тонких по сравнению с их длиной волны проводников) и антенны с излучающим раскрывом (дифракционные). Проволочные (или линейные) могут быть: симметричными и несимметричными, вибраторными, рамочными, спиральными, ромбическими, однопроводными, образовывать антенные решетки из перечисленных излучателей.

Обычно, когда существует ограничение на высоту мачты, применяют СВ-ДВ антенны с верхней емкостной нагрузкой. Наибольшее распространение, даже для мобильных станций, получили антенны с емкостной нагрузкой в виде горизонтального полотна. Известные конструкции таких антенн требуют наличия нескольких мачт [1, 2]. Однако в ряде случаев возникает потребность в излучателе на базе одной мачты. В публикациях по одномастовым антеннам отмечаются два основных направления их разработок: антенны с нижним питанием и антенны с верхним питанием [2]. Основным достоинством последних является применение неизолированных от земли металлических мачт.

По условиям эксплуатации наличие опорного изолятора в конструкции, который предполагается в антеннах нижнего питания, иногда нежелательно, а использовать принцип верхнего питания не всегда представляется возможным. Разработка одномастового несимметричного излучателя со снижением вдоль заземленной мачты нуждается в оценке степени влияния последней на электрические параметры антенны, а также в обоснованном выборе вида верхней емкостной нагрузки.

Основной материал

На рис. 1 и 2 приведены электрические схемы несимметричного излучателя, на которых заземленная мачта (провод 1 радиуса a_1) и снижение (провод 2 радиуса a_2) представлены в виде несимметричной линии длиной l с расстоянием d_1 между ее проводниками. Емкостная нагрузка для антенны рис. 1, а реализована проводником 4 радиуса a_4 и длиной, являющегося продолжением проводника 2, а на рис. 1, б - проводником 4, образующим Г-образную антенну, причем, в общем случае, высота мачты может быть увеличена за счет радиуса проводника 5. Емкостные нагрузки антенны рис. 2 выполнены из проводника 3 радиуса a_3 , размещенного параллельно мачте на расстоянии d_2 относительно провода снижения и образующего с ним двухпроводный шлейф длиной l .

Выражения для распределения тока и напряжения в таких системах и входного сопротивления могут быть получены путем использования уравнений Пистолькорса для электрически несимметричных линий [2]:

$$\begin{cases} U_i = \cos kZ + i \sin kZ \sum_{j=1}^n P_{ij} I_j; \\ I_i = I_j \cos kZ + i \sin kZ \frac{2U_j}{\omega_{ii}} - \sum_{j=1}^n \frac{U_j}{\omega_{ij}}, \end{cases} \quad (1)$$

где индексы $j = 1, 11, \dots$ относятся для значений в точке $z = 0$; k - волновое число свободного пространства; z - координата вдоль провода излучателя. Параметры P_{ij} имеют размерность сопротивлений. Их называют собственными и взаимными электродинамическими волновыми сопротивлениями проводов.

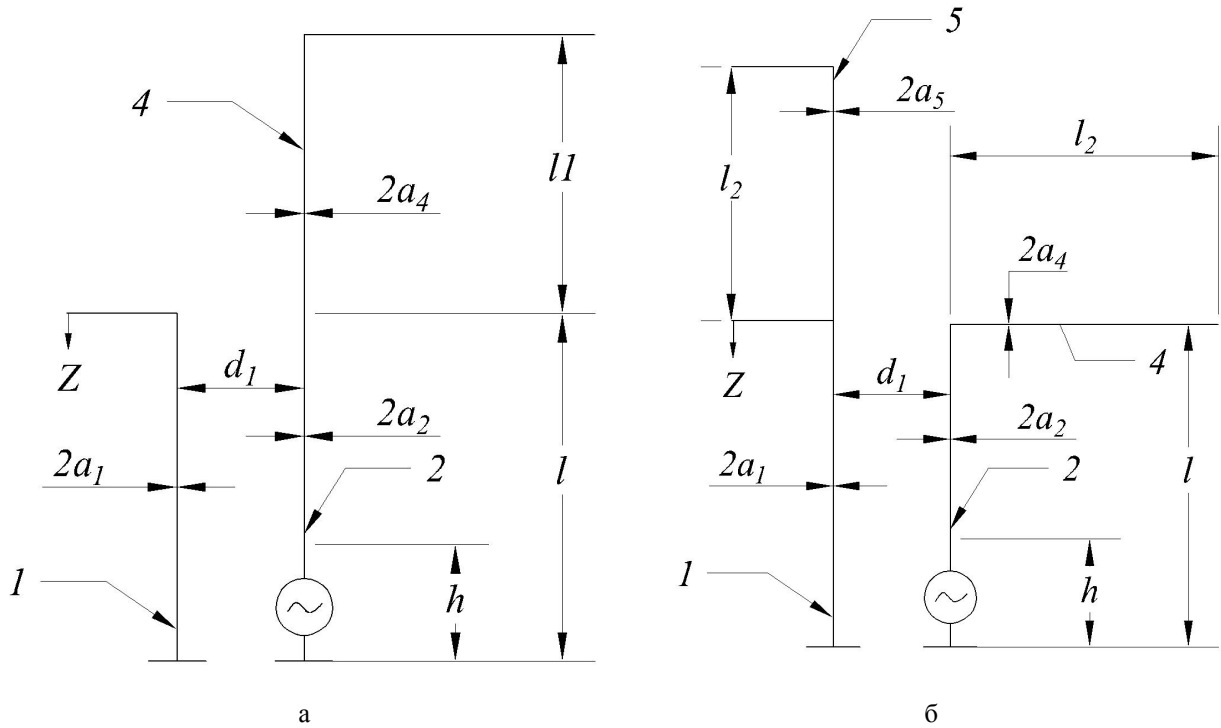


Рис. 1. Электрические схемы несимметричного излучателя:
 а – с вертикальной емкостной нагрузкой на снижении;
 б – Г-образный излучатель и заземленная мачта различной длины

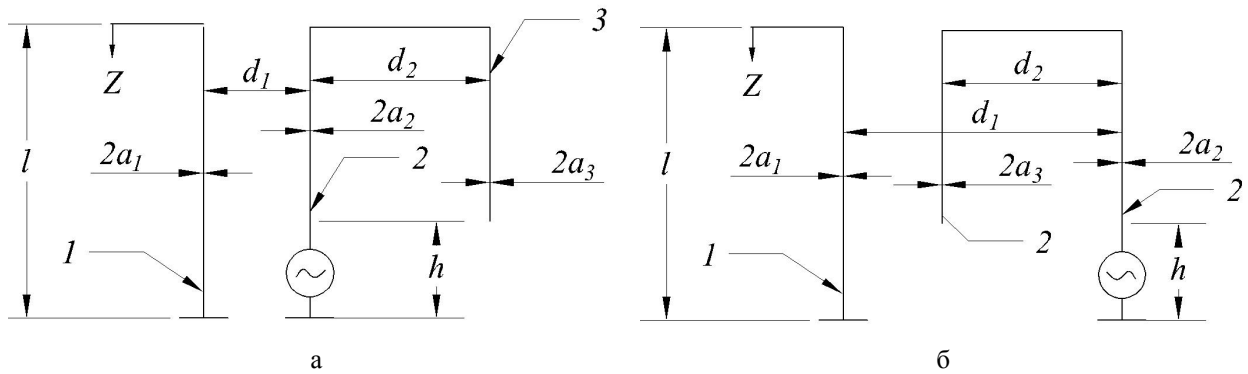


Рис. 2. Электрические схемы несимметричного излучателя с емкостной нагрузкой, образующей со снижением двухпроводным шлейф:
 а – питание на ближнем к мачте проводе;
 б – на внешнем проводе излучателя

Эти параметры связаны с потенциальными коэффициентами P_{ij} проводников соотношением

$$\rho_{ij} = \frac{P_{ij}}{C}, \quad (2)$$

где C – скорость света в свободном пространстве.

Параметры W_{ij} , называемые волновыми электростатическими сопротивлениями, соответствующими выражениями связаны с электродинамическими волновыми сопротивлениями. Таким образом, указанные выше параметры находятся из решения соответствующей электростатической задачи по уравнениям

$$U_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j; \quad (3)$$

$$Q_i = 2C_{ij} U_i - \sum_{j=1}^n C_{ji} U_j, \quad (4)$$

где C_{ij} – собственные и взаимные емкостные коэффициенты (погонные емкости) проводников; U_i , Q_i – потенциалы и заряды проводников соответственно.

Выражения (1) для каждой из рассмотренных схем (рис. 1, 2) могут быть приведены к удобному виду, что выполняется использованием очевидных граничных условий:

– схема рис. 1:

$$U_1 = -I_1 Z_m \quad \text{при } Z=0;$$

$$U_1 = 0, \quad I_2 = I_r \quad \text{при } Z=L; \quad (5)$$

– схема рис. 2:

$$I_1 = 0, \quad I_{III} = -I_{II}, \quad U_{II} = U_{III} \quad \text{при } Z=0$$

$$I_2 = I_r, \quad I_3 = 0, \quad U_1 = 0, \quad \text{при } Z=L \quad (6)$$

Здесь z_m – сопротивление проводника нагрузки на мачте, z_n – сопротивление проводника нагрузки на проводе излучателя, I_r – величина тока генератора, l – высота мачты излучателя.

Из системы уравнений (3, 4) получены конечные выражения для величин электростатических волновых сопротивлений:

– схема рис. 1:

$$\omega_{11} = \frac{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}{\rho_{22}};$$

$$\omega_{22} = \frac{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}{\rho_{11}}; \quad (7)$$

$$\omega_{12} = \frac{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}{\rho_{12}}.$$

Аналогично для схемы рис. 2.

Решение системы уравнений (1) относительно неизвестных токов и напряжений в начале каждой линии выполняется с учетом соответствующих граничных условий (5) и (6). По результатам решения этой системы получены выражения для распределе-

ния суммарного (синфазного) тока по высоте антенны $I_\Sigma(z)$, входного сопротивления $X_{вх}$ напряжения в ней $U_{2вх}$, которые имеют следующий вид:

$$I_z = \frac{I_r}{F} \left(A + i \frac{\rho_{12} B}{\rho_{11} N} \right), \quad (8)$$

$$U_{2вх} = \frac{I_r}{F} \left[Z_n \cos kL + \left(\frac{\rho_{12}^2}{\rho_{11} N} + i \rho_{22} \right) \sin kL \right], \quad (9)$$

Не учитывая влияния излучения на распределение тока в антенне и допуская предположение об однородности параметров проводников на единицу длины, можно принять

$$Z_m = -P_m \operatorname{ctg} k l_1, \quad (10)$$

$$Z_n = -P_n \operatorname{ctg} k l_2, \quad (11)$$

где P_m, P_n – волновые сопротивления соответствующих нагрузок;

l_1, l_2 – длины проводников нагрузок на мачте и проводе антенны соответственно.

Величины P_m, P_n в (10) могут быть определены методом среднего потенциала для каждого конкретного случая их расположения относительно поверхности земли и других элементов схемы. Необходимые, при вычислении P_m и P_n , выражения потенциальных коэффициентов, при произвольной ориентации проводников, в достаточном объеме имеются, например, в работе [3].

Некоторые результаты анализа численных расчетов представлены на рис. 3.

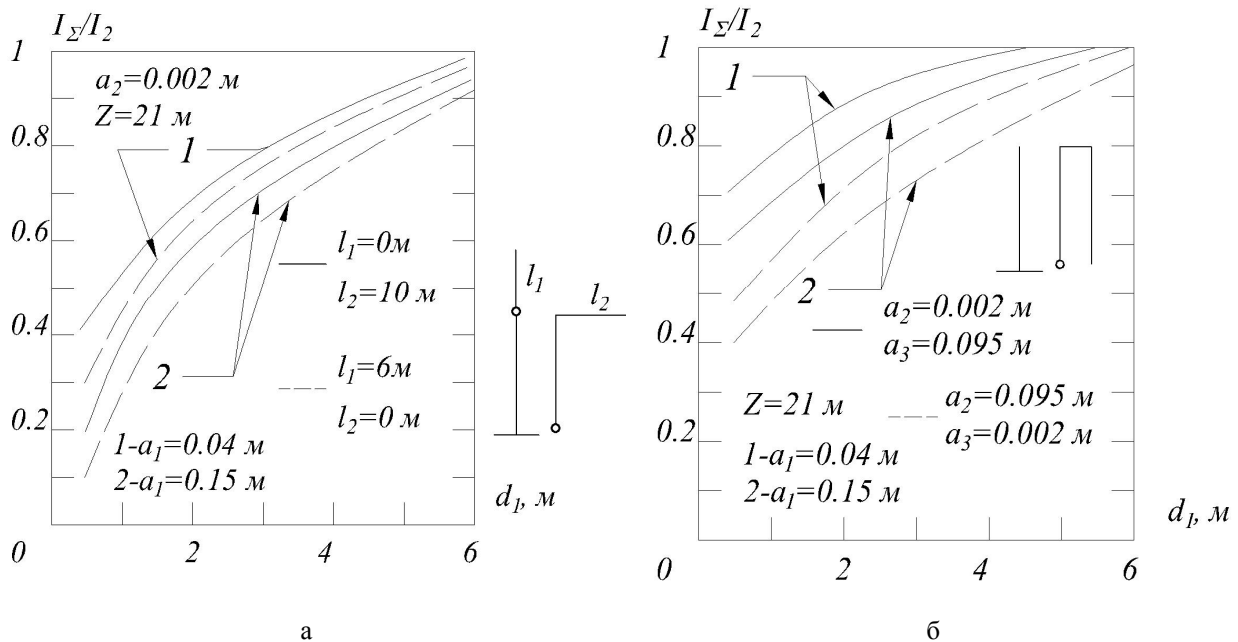


Рис. 3. Зависимость нормированного суммарного тока у основания излучателя от ϕ при различных сочетаниях параметров проводников:
 а – Г-образного и увеличенной высоте мачты;
 б – в виде двухпроводного шлейфа

Приведенные соотношения дают широкие возможности проведения численных расчетов по определению:

степени влияния величин радиусов проводников a_1 ,
расстояний между ними d_1 ,
значений нагрузок, их видов и мест установки на основные параметры подобных излучателей.

Выводы

Основные результаты анализа численных расчетов, часть из которых представлена на рис. 3 приводят к следующим выводам:

1. В любом случае увеличение расстояния между мачтой и вторым проводником (d_1) приводит к существенному росту суммарного тока и повышению входного сопротивления, а увеличение расстояния между вторым и третьим проводником (d_2) сопровождается снижением входного сопротивления. Суммарный ток от величины d_2 практически не зависит

2. Повышение радиуса мачты (d_1) отражается на снижении суммарного тока и несущественном уменьшении входного сопротивления. Значительное снижение входного сопротивления и некоторое снижение суммарного тока наблюдается при увеличении радиуса второго проводника (a_2).

3. Схема питания рис. 2, б по отношению к схеме питания рис. 2, а, при равенстве радиусов ближних к мачте проводников и радиусов дальних

от мачты проводников, не изменяет значений суммарного тока и входного сопротивления.

4. Усложнение геометрии антенны сопровождается относительно быстрым снижением входного сопротивления и, при определенных соотношениях расстояний между мачтой и проводниками (d_1 и d_2), существенным ростом суммарного тока в излучателе.

Результаты теоретического анализа позволяют сформулировать рекомендации по построению мобильной одномачтовой антенны.

Список литературы

1. Марков Г.Т., Сазонов Д. М. Антенны. - М.: Энергия, 1975.
2. Белоусов С.П. и др. Антенны для радиосвязи и радиовещания. Часть 2. Средневолновые и длинноволновые антенны. - М.: Связь, 1960.
3. Муравьев Ю.К. Справочник по расчету проволочных антенн. (Пособие по курсовому и дипломному проектированию). - Л.: ВКАС, 1976.
4. Гавеля Н.П. Часть 1. Под ред. Ю.К. Муравьева. - Л.: ВКАС, 1963.

Надійшла до редколегії 26.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.М. Сільвестров, Національний технічний університет України імені Ігоря Сікорського «КПІ», Київ.

ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ОДНОМАЧТОВОГО НЕСИМЕТРИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

М.К. Бороздин, В.П. Дорогобид, О.О. Таган

Розглядається вплив заземленої щогли на електричні параметри однощоголового випромінювача з верхнім ємнісним навантаженням. Проводиться аналіз двох основних розробок однощоголових антен, антени з нижнім живленням і антени з верхнім живленням. Наведено електричні схеми різних типів несиметричних випромінювачів. Описано всі навантаження, які є в системах. Вирази для розподілу струму і напруги в таких системах і вхідного опору отримані шляхом використання рівнянь Пістолькорса для електрично несиметричних ліній. Розв'язок системи рівнянь щодо невідомих струмів і напруг на початку кожної лінії виконано з урахуванням відповідних граничних умов. Представлені співвідношення дають широкі можливості проведення чисельних розрахунків по визначенню ступеня впливу величин радіусів провідників, відстаней між ними, значень навантажень, їх видів і місць установки на основні параметри подібних випромінювачів.

Ключевые слова: антенна с нижним, верхним питанием, емкостная нагрузка, электродинамическая нагрузка, электродинамическое волновое сопротивление.

ELECTRICAL PARAMETERS OF SINGLE MAST UNSYMMETRICAL RADIATOR

N.K. Borozdin, V.P. Dorohobid, O.O. Tagan

The influence of the grounding of the mast on the electrical parameters of single mast radiator with upper capacitive load. An analysis of two main developments of single-mast antennas, antennas with a lower power supply and antennas with an upper power supply are analyzed. Electrical diagrams of different types of asymmetric radiators are given. Describe all the loads that are in the systems. Expressions for the distribution of current and voltage in such systems and the input resistance are obtained by using the Pistolcors equations for electrically asymmetric lines. The solution of the system of equations for unknown currents and voltages at the beginning of each line is performed taking into account the corresponding boundary conditions. The presented relationships provide ample opportunities for numerical calculations to determine the degree of influence of the values of the radii of conductors, the distances between them, the values of loads, their types and locations of installation on the main parameters of such radiators.

Keywords: antenna with the lower, upper-powered, capacitive load, electrodynamic load Electromagnetic wave resistance.

УДК 621.396

В.К. Волосяк, С.С. Жила, В.В. Павліков

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "ХАІ", Харків

КВАЗІОПТИМАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ФОРМУВАННЯ РАДІОМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИСОКОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ В ШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМАХ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗУ

Синтезовані алгоритми оптимального оцінювання електрофізичних параметрів і статистичних характеристик просторово-протяжних об'єктів в широкосмугових системах апертурного синтезу. Показано, що алгоритмічна і системотехнічна реалізація оптимального алгоритму складна на практиці, тому виконаний перехід до квазіоптимальної обробки сигналів в просторово-розподілених радіометричних системах. При синтезі алгоритму спочатку передбачається можливість реєстрації поля в межах деякої континуальної області (гіпотетичного реєструючого середовища, характерного, наприклад, для лінз в оптичному діапазоні) з подальшим переходом до дискретної області (антенної решітки).

Ключові слова: статистична оптимізація, електрофізичні параметри, статистичні характеристики, надширокошмугова обробка, апертурний синтез.

Вступ

Побудова радіометричних зображень (РМЗ) просторово-протяжних об'єктів і дослідження їх електрофізичних параметрів і статистичних характеристик у вигляді функцій просторових координат необхідні при вирішенні задач дистанційного зондування Землі, пасивної радіолокації, метеорології і медицини. Основними технічними засобами побудови просторового розподілу радіояскравості є скануючі радіометри з однією антеною або системи апертурного синтезу [1-8] – багатопозиційні радіометричні системи з інтерферометричною обробкою просторово-часових сигналів. В останніх відновлення радіояскравості об'єктів дослідження виконується відповідно до теореми Ван Ціттета-Цернике [9], що зв'язує РМЗ і функцію взаємної просторової когерентності за допомогою багатовимірного перетворення Фур'є. Даний підхід отриманий шляхом евристичних рішень або в рамках класичної кореляційної теорії випадкових процесів не дозволяє обробляти широкосмугові, надширокошмугові і багатосмугові радіо теплові поля. У той же час стрімкий розвиток елементної бази НВЧ техніки відкриває нові можливості підвищення точності і роздільної здатності. Також актуальними є питання оптимального синтезу алгоритмів обробки шумових сигналів в радіометричних системах, що надає можливість оцінити потенційні похибки алгоритмів, пристроїв і систем.

Мета роботи – статистичний синтез оптимального алгоритму формування РМЗ в широкосмугових системах апертурного синтезу і дослідження можливості переходу до квазіоптимальної обробки, що спрощує алгоритмічну і системотехнічну реалізацію. Особливістю вирішення поставленої задачі є застосування V-перетворень [1] і отримання алгоритмів і структур систем обробки надширокошмугового випромінювання в ситуаціях, коли умова просторово-часової вузькосмуговості (ПЧВ), або, що те ж саме, умова квазімонохроматичного наближення (КМН) [1, 10], не виконується.

Рівняння спостереження

Модель рівняння спостереження для багатопозиційних радіометричних систем запишемо у вигляді $\vec{u}_\Sigma(t, \vec{r}') = \|u_{k\Sigma}(t, \vec{r}')\| = \vec{u}_s(t, \vec{r}', \vec{\lambda}) + \vec{u}_n(t, \vec{r}') + \vec{n}_p(t, \vec{r}')$, (1) де $\vec{u}_s(t, \vec{r}', \vec{\lambda}) = \|u_{ks}(t, \vec{r}', \vec{\lambda})\| = \|u_{kD}(t, \vec{r}', \vec{\lambda})\| + \|u_{k\Phi}(t, \vec{r}')\|$, $\vec{u}_n(t, \vec{r}') = \|u_{kn}(t, \vec{r}')\|$, $\vec{n}_p(t, \vec{r}') = \|n_{kp}(t, \vec{r}')\|$, $k = \overline{1, K}$, $\vec{r}' = (x', y') \in D'$, $t \in (0, T)$. Всі процеси, що входять в це рівняння, вважаємо статистично незалежними однорідними і стаціонарними випадковими гаусовими функціями. Індекс може відповідати виду поляризації, номеру частотного піддіапазону. Процеси $u_{ks}(t, \vec{r}', \vec{\lambda})$ містять нероздільні між собою корисне випромінювання $u_{kD}(t, \vec{r}', \vec{\lambda})$ середовища і перешкоджаючі випромінювання $u_{k\Phi}(t, \vec{r}')$, що включають в себе зовнішній фон. Вважаємо, що ці процеси спостерігаються після проходження вхідних лінійних частин приймальних пристроїв (ЛЧП), що обмежують спектр випромінювання коефіцієнтами передачі $\dot{K}_k(j2\pi f)$, а також просторову область прийому деяким сектором кутів, заданих функцією спрямованості $\dot{F}_A(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0, f)$. Ширина амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) $|\dot{K}_k(j2\pi f)|$ може бути будь-якою, але не нескінченною, і відповідати визначенню надширокошмугових, широкошмугових, багатосмугових, багаточастотних і вузькосмугових радіометричних систем.

Випромінювання $u_{ks}(t, \vec{r}', \vec{\lambda})$ в спектральній області будемо характеризувати спектрально-кутовою щільністю комплексної амплітуди

$$\dot{A}_{ks}[\vec{\vartheta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\vartheta})] = \dot{K}_k(j2\pi f) \dot{F}_A(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0, f) \dot{A}_{ok}[\vec{\vartheta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\vartheta})], \quad (2)$$

де $\vec{\vartheta}_0$ – напрямок максимуму функції спрямованості; $\dot{A}_{ok}(\vec{\vartheta}, f, \vec{\lambda}) = \dot{A}_{kD}(\vec{\vartheta}, f, \vec{\lambda}) + \dot{A}_{k\Phi}(\vec{\vartheta}, f)$ – спектрально-

кутова щільність комплексної амплітуди на вході антенної системи, що містить корисні $\dot{A}_{kD}(\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda})$ і завадові $\dot{A}_{k\Phi}(\bar{\vartheta}, f)$ складові. Останні фільтруються по частотним і просторовим змінним функціями $\dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0, f)$ і $\dot{K}_k(j2\pi f)$ разом з корисними сигналами випромінювання. Яскравість випромінювання на виході додетекторного тракту з урахуванням діаграми спрямованості і АЧХ може бути записана у вигляді

$$B_{ks}[\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] = |\dot{K}_k(j2\pi f)|^2 |\dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0, f)|^2 B_{ok}[\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})], \quad (3)$$

$$B_{ok}(\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda}) = B_{kD}(\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda}) + B_{k\Phi}(\bar{\vartheta}, f). \quad (4)$$

Процеси $\bar{u}_n(t, \bar{r}') = \|u_{kn}(t, \bar{r}')\|$ в рівнянні спостереження (1) - це моделі внутрішніх дельта-корельованих шумів $n_k(t, \bar{r}')$ вхідних елементів і кіл, що мають кореляційні функції $(N_{ok}/2)\delta(t_1 - t_2)\delta(\bar{r}'_1 - \bar{r}'_2)$, що також пройшли ЛЧП просторово-розподілених приймальних пристроїв. Спектральні щільності потужності вихідних процесів ЛЧП $u_{kn}(t, \bar{r}')$ в кожній точці \bar{r}' дорівнюють $(N_{ok}/2)|\dot{K}_k(j2\pi f)|^2$. Кореляційна функція спостереження

$$R_{ku_n}(t_1 - t_2, \bar{r}'_1 - \bar{r}'_2) = \langle u_{kn}(t_1, \bar{r}'_1)u_{kn}(t_2, \bar{r}'_2) \rangle = 0,5N_{ok}H_k(t_1 - t_2)\delta(\bar{r}'_1 - \bar{r}'_2), \quad (5)$$

де $H_k(t_1 - t_2) = F^{-1}[|\dot{K}_k(j2\pi f)|^2]$.

Для забезпечення коректності розв'язку оберненої задачі відновлення РМЗ введемо в рівняння спостереження (1) невеликі регуляризуючі добавки $\bar{n}_p(t, \bar{r}') = \|n_{kp}(t, \bar{r}')\|$ у вигляді незалежних між собою гаусових білих шумів з кореляційними функціями $R_{kp}(t_1 - t_2) = (N_{okp}/2)\delta(t_1 - t_2)\delta(\bar{r}'_1 - \bar{r}'_2)$.

Шукані спектральні яскравості $\bar{\lambda}(\bar{\vartheta}) = B_{ks}(\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda})$ джерел випромінювання пов'язані з кореляційними функціями $R_{ku_s}(\Delta\bar{r}', \tau, \bar{\lambda})$ перетвореннями V_F і V_F^{-1} :

$$f^{-2}c^2 B_{ks}[\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] = V_F[R_{ku_s}(\Delta\bar{r}', \tau, \bar{\lambda})] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{ku_s}(\Delta\bar{r}', \tau, \bar{\lambda}) \exp\{-j2\pi f(\tau + c^{-1}\bar{\vartheta} \Delta\bar{r}')\} d\tau d\bar{r}', \quad (6)$$

$$R_{ku_s}(\Delta\bar{r}', \tau, \bar{\lambda}) = \langle [u_{ks}(\bar{r}'_1, t_1)u_{ks}(\bar{r}'_2, t_2)] \rangle = V_F^{-1}\{B_{ks}[\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]\} =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B_{ks}[\bar{\vartheta}, f, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] \exp\{j2\pi f(\tau + c^{-1}\bar{\vartheta} \Delta\bar{r}')\} df d\bar{\vartheta}. \quad (7)$$

Вирішення оптимізаційної задачі

Оптимальні оцінки просторово-розподілених параметрів $\bar{\lambda}(\bar{\vartheta})$ можна отримати в результаті варіаційних рішень рівнянь правдоподібності вигляду:

$$\sum_{k=1}^K \iiint_{T T' D' D'} \frac{\delta R_{k\Sigma}[t_1, t_2, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]}{\delta \lambda_j(\bar{\vartheta})} \times$$

$$\times W_{k\Sigma}[t_2, t_1, \bar{r}'_2, \bar{r}'_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] dt_1 dt_2 d\bar{r}'_1 d\bar{r}'_2 \Rightarrow \sum_{k=1}^K \iiint_{T T' D' D'} \frac{\delta W_{k\Sigma}[t_1, t_2, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]}{\delta \lambda_j(\bar{\vartheta})} \times u_{k\Sigma}(t_1, \bar{r}'_1)u_{k\Sigma}(t_2, \bar{r}'_2) dt_1 dt_2 d\bar{r}'_1 d\bar{r}'_2. \quad (8)$$

Тут $\delta R_{k\Sigma} / \delta \lambda_j$, $\delta W_{k\Sigma} / \delta \lambda_j$ - варіаційні похідні.

Між лівою і правою частинами стоїть не знак рівності, а знак прирівнювання « \Rightarrow ». Ліва частина цього рівняння не дорівнює правій, а є її математичним сподіванням. Рішення рівняння правдоподібності:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_2^4}{c^4} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f_1)\dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}(f_2, \bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_2))} \times \left| \dot{\Psi}(f_1 - f_2, (f_1\bar{\vartheta}_1 - f_2\bar{\vartheta}_2)c^{-1}) \right|^2 d\bar{\vartheta}_2 df_1 df_2 \Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_1^4}{c^4} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f_1)\dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}^2(f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1))} \times |\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f_1\bar{\vartheta}_1)|^2 df_1, \quad (9)$$

де $\dot{\Psi}(f_1 - f_2, (f_1\bar{\vartheta}_1 - f_2\bar{\vartheta}_2)c^{-1})$ - базова функція невизначеності, $|\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f_1\bar{\vartheta}_1)|^2$ - V_F -періододіаграма, обмежена інтервалами спостереження T і D' ,

$$B_{k\Sigma}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] = B_{ks}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] + \frac{f^2}{c^2} \frac{N_{ok}}{2} |\dot{K}_k(j2\pi f)|^2 + \frac{f^2}{c^2} \frac{N_{okp}}{2}.$$

Праві частини (9) - це вихідні ефекти передбачуваної системи апертурного синтезу, що є основою цього оптимального алгоритму обробки прийнятого випромінювання, що містить основні операції, які необхідно виконати над прийнятим полем, і структуру радіометричної системи. Найбільш істотна операція - формування V_F -періододіаграми, яка включає в себе операції фільтрації прийнятих процесів і їх розділення на сукупність спектральних складових за часовими частотами f , фазової затримки кожної зі складових на величину $2\pi f\bar{\vartheta}'/c$ і синфазного підсумовування затриманих сигналів по всіх елементах розкриття антени. Множник, що стоїть перед періододіаграмою в правій частині (9), - це квадрат АЧХ оптимального декорелюючого фільтра. Фільтр є адаптивним, тому що знаменник $B_{k\Sigma}^2[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]$ множника, що стоїть перед періододіаграмою, залежить від параметрів $\bar{\lambda}(\bar{\vartheta})$. Із системи (9) отримаємо ряд квазіоптимальних рішень для спрощення її алгоритмічної і системотехнічної реалізації.

Квазіоптимальні алгоритми формування РМЗ у випадку постійності спектральної яскравості в межах функції невизначеності

Розглянемо кілька можливих спрощень отриманого алгоритму (9) для розуміння фізичної сутності обробки сигналів.

1. Випадок "ідеальної" роздільної здатності. Нехай розкрив D' антенної системи - прямокутний зі сторонами прямокутника X'_m, Y'_m , які умовно вважаємо прагнуть до нескінченності. час спостереження T також будемо вважати нескінченно великим. Базову функцію невизначеності в цьому випадку приблизно можна визначити таким виразом:

$$|\Psi(f_1 - f_2, f_1 \bar{\vartheta}_1 - f_2 \bar{\vartheta}_2)|^2 \approx TX'_m Y'_m c^2 f^{-2} \delta(f_1 - f_2) \delta(\vartheta_1 - \vartheta_2). \quad (10)$$

Підставивши цю функцію невизначеності в (9), отримаємо таку систему рівнянь для формування РМЗ:

$$TX'_m Y'_m \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f^2}{c^2} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f) \dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0, f)|^2}{B_{k\Sigma}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]} df \Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f^4}{c^4} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f) \dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0, f)|^2}{B_{k\Sigma}^2[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]} |\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f, \bar{\vartheta})|^2 df. \quad (11)$$

2. Випадок високої роздільної здатності.

Будемо вважати розміри розкриття кінцевими, але роздільну здатність достатньо високою, що дозволить вважати знаменник $B_{k\Sigma}(f_2, \bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_2))$ в лівій частині рівняння (9) практично постійним в межах ширини функції $\Psi(\cdot)$. Тоді його можна винести з-під знака інтеграла при значеннях змінних $f_2 = f_1, \bar{\vartheta}_2 = \bar{\vartheta}_1$. В результаті отримаємо

$$\int_{-\infty}^{\infty} df_1 \frac{f_1^4}{c^4} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f_1) \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}[f_1, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1)]} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} df_2 d\vartheta_2 |\Psi(f_1 - f_2, f_1 \bar{\vartheta}_1 - f_2 \bar{\vartheta}_2) c^{-1}|^2 \Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_1^4}{c^4} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f_1) \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}^2(f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1))} \times |\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f_1 \bar{\vartheta}_1)|^2 df_1. \quad (12)$$

У цьому випадку немає необхідності вирішувати зворотну задачу вилучення спектральної яскравості $B_{0k}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]$ з-під інтеграла по змінній $\bar{\vartheta}_2$ в рівнянні (9). Обчисливши подвійний інтеграл від базової функції невизначеності і помноживши в лівих частинах чисельник і знаменник на функцію $B_{k\Sigma}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]$, запишемо (12) у такому вигляді:

$$TX'_m Y'_m \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f^2}{c^2} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f) \dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0, f)|^2}{B_{k\Sigma}^2[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]} B_{k\Sigma}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] df \Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_1^4}{c^4} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f_1) \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}^2(f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1))} \times |\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f_1 \bar{\vartheta}_1)|^2 df_1 = Y_{\text{вих } k}(\bar{\vartheta}). \quad (13)$$

Праві частини цих рівнянь - вихідні ефекти радіометричної системи, які характеризують основні операції, що виконуються над прийнятим полем при

оцінках параметрів $\bar{\lambda}(\bar{\vartheta})$. Періодограма $|\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f, \bar{\vartheta})|^2$ є неспроможною оцінкою спектральної яскравості $B_{k\Sigma}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]$ як функції частоти f і напрямку $\bar{\vartheta}$. Процедура усереднення цієї періодограми по частотах забезпечує її спроможність. Однак, як зазначалося, перед усередненням, коливання $u(t, \vec{r}')$ підлягають декореляції в інверсному фільтрі, частотна характеристика якого визначається множителем, що стоїть перед періодограмою. Процедура декореляції зменшує радіуси кореляції за часом t і координатам \vec{r}' , збільшуючи число незалежних відліків процесів, що беруть участь в усередненні по цим змінним. За рахунок декореляції розширюється АЧХ фільтра, квадрат якої є множителем при періодограмі, що збільшує число незалежних відліків в спектральній області, які беруть участь при інтегуванні по частотах f.

Виключивши декореляцію і враховуючи

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f, \bar{\vartheta})|^2 df = \int_T [u_{kD'}(t, \bar{\vartheta})]^2 dt,$$

приходимо до квазіоптимального алгоритму, близькому за принципом дії до класичного багатоканального багатопробеневого радіометру, який запишемо таким чином:

$$\hat{B}_{0k}[f_0, \hat{\lambda}(\bar{\vartheta})] = \frac{1}{\Delta f_k TX'_m Y'_m |\dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0, f_0)|^2} \times \int_T [u_{kD'}(t, \bar{\vartheta})]^2 dt - B_{nk}(\bar{\vartheta}), \quad (14)$$

де $\hat{B}_{0k}[f_0, \bar{\vartheta}, \hat{\lambda}(\bar{\vartheta})]$ статистичні оцінки

$$B_{0k}[f_0, \bar{\vartheta}, \hat{\lambda}(\bar{\vartheta})], \quad B_{nk}(\bar{\vartheta}) = \frac{N_{0k} \Delta f_{1k}}{2\Delta f_k |\dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0, f_0)|^2},$$

$$\Delta f_k = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f^2}{c^2} |\dot{K}_k(j2\pi f)|^2 df, \quad \Delta f_{1k} = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}_k(j2\pi f)|^2 df,$$

$$u_{kD'}(t, \bar{\vartheta}) = \int_{D'} u_{k\Sigma}(t - \bar{\vartheta} \vec{r}' / c, \vec{r}') d\vec{r}' -$$

процес, отриманий у результаті інтегування за змінною \vec{r}' (в реальних антенних решітках - в результаті підсумовування) сигналів, затриманих на виході кожного приймального елемента з координатами \vec{r}' на величину $\bar{\vartheta} \vec{r}' / c$.

Суть обробки сигналів згідно з алгоритмом (14) полягає в наступному:

1) затримці коливань $u_{k\Sigma}(t, \vec{r}')$ в кожному елементі антенної системи з координатами \vec{r}' і формування синфазних (відповідно до нахилу фронту поля $u_{k\Sigma}(t, \vec{r}')$) коливань $u_{k\Sigma}(t - \bar{\vartheta} \vec{r}' / c)$ для кожного напрямку $\bar{\vartheta}$;

2) синфазне інтегування затриманих коливань (для дискретних антенних решіток - додавання) і формування сигналів $u_{kD'}(t, \bar{\vartheta})$;

3) формуванні сигналів, пропорційних до середньої потужності підсумованих коливань, отриманих для кожного напрямку $\bar{\vartheta}$ окремо.

Зауважимо, що операція затримки поля є корисною лише для складової $u_{k\Sigma}(t, \bar{r}')$ в рівнянні спостереження (1). Зсув $B_{nk}(\bar{\vartheta})$ оцінки яскравості $\hat{V}_{0k}[f_0, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]$ може бути усунено. Для того щоб сформувавши зображення $\hat{V}_{0k}[f_0, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]$ необхідно ці операції реалізувати для безлічі напрямків $\bar{\vartheta}$, тобто синтезована система повинна бути багатоканальною або виконувати сканування.

При використанні дискретного розкриття (антенної решітки), що складається з набору елементарних антен, цим алгоритмом при оцінці однієї спектральної яскравості $\hat{V}_{0k}(\bar{\vartheta})$ і одного параметра $\hat{\lambda}(\bar{\vartheta})$ відповідає структурна схема, наведена на рис. 1.

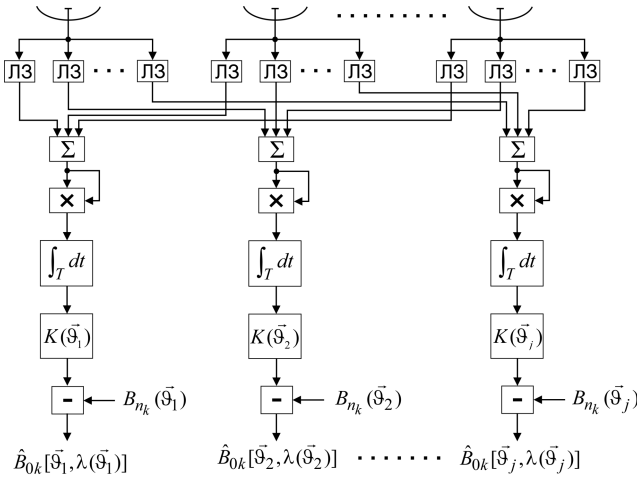


Рис. 1. Структурна схема синтезованої системи з антенною решіткою

У схемі на рис. 1 система ліній затримок (ЛЗ) затримує сигнали відповідно до нахилу фронту падаючого поля. У суматорах для кожного з напрямків $\bar{\vartheta}_j$, обраних з деяким інтервалом дискретизації сектора огляду, здійснюється синфазне підсумовування сигналів (інтегрування $\int_D u_{k\Sigma}(t - \bar{\vartheta}\bar{r}'/c, \bar{r}')d\bar{r}'$ замінене підсумовуванням $\sum_{i=1}^M u_{k\Sigma}(t - \bar{\vartheta}\bar{r}'/c, \bar{r}'_i)$, де \bar{r}'_i – координати фазових центрів елементарних антен), що надходять з виходів елементів антенної решітки. Після множення отриманих сигналів на функцію $K(\bar{\vartheta}_j) = [\Delta f_k TX'_m Y'_m | \dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_j, f_0) |^2]^{-1}$, рівну зворотній діаграмі спрямованості по потужності елементарної антени, що входить до складу антенної решітки, а також після нормування на величину $\Delta f_k TX'_m Y'_m$ і віднімання зсувів $B_{nk}(\bar{\vartheta})$ маємо оцінку спектральної яскравості $\hat{V}_{0k}(\bar{\vartheta})$. З матема-

тичної залежності цієї яскравості $\hat{V}_{0k}[\bar{\vartheta}_j, \lambda(\bar{\vartheta}_j)]$, певної електродинамічної або емпіричної моделі теплового випромінювання досліджуваного середовища, вирішивши відповідну систему нелінійних рівнянь [1], знаходимо оцінки параметрів $\hat{\lambda}(\bar{\vartheta}_j)$.

Розрахунок граничних похибок

Граничні похибки знаходимо в результаті обмеження оператора Фішера з елементами:

$$\Phi_{\mu, \bar{\vartheta}_1, \nu, \bar{\vartheta}_2} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \int_T \int_{T'} \int_{D'} \frac{\delta W_{k\Sigma}[t_1, t_2, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]}{\delta \lambda_{\mu}(\bar{\vartheta}_1)} \times \frac{\delta R_{k\Sigma}[t_2, t_1, \bar{r}'_2, \bar{r}'_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]}{\delta \lambda_{\nu}(\bar{\vartheta}_2)} d\bar{r}'_1 d\bar{r}'_2 dt_1 dt_2. \quad (15)$$

Зауважимо, що всі процеси $u_{k\Sigma}(t, \bar{r}')$ в рівнянні спостереження (1) поклалися статистично незалежними, стаціонарно однорідними, з кореляційними функціями, залежними від різниці аргументів.

Вважаючи, що час спостереження T великий і тому базова функція невизначеності вузька і роздільна здатність по змінній f висока ($B_{k\Sigma}(f_1 \dots) \approx B_{k\Sigma}(f_2 \dots)$), отримаємо

$$\Phi_{\mu, \bar{\vartheta}_1, \nu, \bar{\vartheta}_2} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{\infty} df_1 \frac{f_1^4}{c^4} \frac{1}{B_{k\Sigma}^2[f_1, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1)]} \times \frac{\partial B_{k\Sigma}[f_1, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1)]}{\partial \lambda_{\mu}(\bar{\vartheta}_1)} \frac{\partial B_{k\Sigma}[f_1, \bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_2)]}{\partial \lambda_{\nu}(\bar{\vartheta}_2)} \times \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(f_1 - f_2, f_1 \bar{\vartheta}_1 - f_2 \bar{\vartheta}_2)|^2 df_2. \quad (16)$$

Припустивши, що яскравість в межах смуги $K(j2\pi f)$ практично постійна $V_{0k}(f \dots) \approx V_{0k}(f_0 \dots)$, а також, що

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(f_1 - f_2, f_1 \bar{\vartheta}_1 - f_2 \bar{\vartheta}_2)|^2 df_2 \approx T |\Psi_{D'}[f_1(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)]|^2,$$

отримаємо

$$\Phi_{\mu, \bar{\vartheta}_1, \nu, \bar{\vartheta}_2} = \frac{1}{2} T \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi_{D'}[f(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)]|^2 df \times \sum_{k=1}^K \frac{\partial B_{0k}(f_0, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1))}{\partial \lambda_{\mu}(\bar{\vartheta}_1)} \frac{\partial B_{0k}(f_0, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_2))}{\partial \lambda_{\nu}(\bar{\vartheta}_2)}. \quad (17)$$

Останнє припущення не є істотним при оцінці інтегральних характеристик радіотеплового випромінювання.

Тут функція $\Psi_{D'}[f(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)]$ є функцією невизначеності синтезованої надширокопasmугової радіометричної системи

$$\Psi_{D'}(f(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)) = \text{sinc} \left[\pi \frac{f(\vartheta_{1x} - \vartheta_{2x})}{c} X'_m \right] \times \times X'_m Y'_m \text{sinc} \left[\pi \frac{f(\vartheta_{1y} - \vartheta_{2y})}{c} Y'_m \right].$$

З виразу (17) слідує залежність граничних похибок оцінок параметрів $\bar{\lambda}(\bar{\Theta})$ від ширини квадрату модуля функції невизначеності $\Psi_{D'}(f(\bar{\Theta}_1 - \bar{\Theta}_2))$, тобто діапазону частот і розміру розкриву D' та інтервалу спостереження T .

Висновки

Синтезований алгоритм оптимального формування РМЗ в широкопалосових системах апертурного синтезу. В основі цього алгоритму лежить операція формування V_F -періодограми, яка включає в себе операції фільтрації прийнятих процесів та їх розділення на сукупність спектральних складових за частотами f , фазової затримки кожної зі складових на величину $2\pi f \bar{\Theta}_T' / c$ і синфазного підсумовування затриманих сигналів по всіх елементах розкриву (елементам антенної решітки).

Обґрунтовано перехід до квазіоптимальних алгоритмів формування РМЗ. Для дискретної області реєстрації радіотеплового поля (антенної решітки) розроблено структурну схему радіометричної системи. Отримано аналітичний вираз для оператора Фішера, з аналізу якого випливає, що граничні похибки залежать від ширини квадрата модуля функції невизначеності і інтервалу спостереження за часом.

Список літератури

1. Волосяк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко. Под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. 740 с.
2. Kutuza B.G. Two-dimensional synthetic aperture millimeter-wave radiometric interferometer for measuring full-component Stokes vector of emission from hydrometeors / B.G. Kutuza, G.K. Zagorin // *Radio Science*. – 2002. – Vol. 38, No. 3. – P. MAR 20-1.

3. Караваев В.В. Статистическая теория пассивной локации / В.В. Караваев, В.В. Сазонов. – М.: Радио и связь, 1987. 240 с. 6. Wilson Th.L. Tools of Radio Astronomy: Problems and Solutions / Th.L. Wilson, K. Rohlf, S. Hüttemeister. – Springer, 2009. 536 p.

4. Построение изображений в астрономии по функциям когерентности. Пер. с англ. / Ред. К. Ван Схонвелд. – М.: Мир, 1982. 317 с.

5. Kerr, Y.H. Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission / Y.H. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J. Martinuzzi, J. Font, M. Berger // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Trans. on*. – V.39, No.8. – P. 1729–1735. – Aug 2001. DOI: 10.1109/36.942551. 10.

6. Pavlikov V. V. Algorithm for Radiometric Imaging by Ultrawideband Systems of Aperture Synthesis/ V. V. Pavlikov, Kiem Nguyen Van, O. M. Tymoshchuk // *IEEE Radar Methods and Systems Workshop. (RMSW 2016) : proc. Intern. conf., 27-28 Sept., 2016, Kyiv, Ukraine*. – P. 103–106.

7. Pavlikov V. V. Spectral Method for the Spatio-Spectral Sensitivity Domain Filling in Aperture Synthesis System / V. V. Pavlikov, Kiem Nguyen Van, O. M. Tymoshchuk // *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. (UWBUSIS 2016) : proc. 8th Intern. conf., 5-11 Sept., 2016, Odesa, Ukraine*. – [Kharkov], 2016. – P. 124–127.

8. Pavlikov V. V. Optimal signal processing for radiometric imaging with multi-antenna & multi-band passive radars / V. V. Pavlikov, S. S. Zhyla, Nguen Van Kiem and O.V. Odokienko // *Antenna theory and techniques. ICATT'2015 : proc. of the X Intern. conf., Apr. 21–24, 2015, Kharkiv, Ukraine*. – [Kharkiv], 2015. – P. 179–181.

9. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф // *Перевод с англ.* – М.: Наука. 1973. 720 с.

10. Фалькович, С. Е. Основы статистической теории радиотехнических систем [Текст] / С. Е. Фалькович, П. Ю. Костенко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 390 с.

Надійшла до редколегії 27.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. М.В. Руженцев, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Харків.

КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМАХ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА

В.К. Волосяк, С.С. Жила, В.В. Павликов

Синтезированы алгоритмы оптимального оценивания электрофизических параметров и статистических характеристик пространственно-протяженных объектов в широкополосных системах апертурного синтеза. Показано, что алгоритмическая и системотехническая реализация оптимального алгоритма затруднительна на практике, поэтому выполнен переход к квазиоптимальной обработке сигналов в пространственно-распределенных радиометрических системах. При синтезе алгоритма вначале предусматривается возможность регистрации поля в пределах некоторой континуальной области (гипотетической регистрирующей среды, характерной, например, для линз в оптическом диапазоне) с последующим переходом к дискретной области (антенной решетке).

Ключевые слова: статистическая оптимизация, электрофизические параметры, статистические характеристики, сверхширокополосная обработка, апертурный синтез.

QUASIOPTIMAL ALGORITHMS OF HIGH RESOLUTION RADIOMETRIC IMAGING IN THE BROADBAND SYSTEMS OF APERTURE SYNTHESIS

V.K. Volosyuk, S.S. Zhyla, V.V. Pavlikov

Algorithms of optimal estimation of electrophysical parameters and statistical characteristics of spatio-temporal objects in the broadband aperture synthesis systems are synthesized. It is shown that algorithmic and the technical implementation of the optimal algorithm is difficult in practice therefore transition to quasioptimal signal processing in the spatial distributed radiometric systems is performed. In case of synthesis of the algorithm it is suppose the possibility of a field receiving within some continual area (the hypothetical registering environment, for example lenses in optical band) with the subsequent transition to the discrete area (antenna array).

Keywords: statistical optimization, electrophysical parameters, statistical characteristics, ultrawideband processing, aperture synthesis.

УДК 621.396.96

Е.Л. Казаков¹, А.Е. Казаков², В.М. Решетник³¹ Кировоградская летная академия НАУ, Кропивницкий² Харьковская государственная академия культуры, Харьков³ Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-РАСSEИВАЮЩИХ СВОЙСТВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ПОГЛОЩАЮЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Проведена экспериментальная оценка поляризационно-рассеивающих свойств цилиндрической цели, на которой нанесен резонансный поглощающий материал, при совмещенном и разнесенном приеме. Рассмотрены результаты экспериментальных измерений коэффициентов отражения от цилиндрической цели покрытой широкополосным поглощающим материалом, при ее облучении узкополосными сигналами на различных поляризациях.

Ключевые слова: радиолокационный сигнал, радиолокационная цель, радиопоглощающий материал, поляризационная матрица рассеяния.

Введение

Постановка проблемы. В настоящее время для уменьшения заметности и увеличения ошибок определения координат радиолокационных целей (РЛЦ) широкое применение находят радиопоглощающие материалы (РПМ). Однако, для их успешного использования необходимо предварительно оценить отражательные характеристики (характеристики рассеяния) различных типов этих материалов. Применение в РЛС широкого диапазона частот на различных поляризациях настоятельно требует получения количественных значений характеристик рассеяния целей, покрытых РПМ, для этих типов сигналов. Также в связи с переходом при наблюдении за РЛЦ от однопозиционных РЛС к РЛС с разнесенным приемом возникает необходимость получения характеристик рассеяния РЛЦ с поглощающими материалами в вынесенных на разные углы приемных пунктах. Кроме того целесообразно провести анализ получаемых характеристик рассеяния по одним и тем же целям применительно к различным используемым частотам, поляризациям и различным условиям наблюдения для одного и того же измерительного комплекса. В качестве исследуемой цели будет использован цилиндр, так как его характеристики отражения и рассеивания достаточно известны.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время получение информации о характеристиках рассеяния РПМ может быть осуществлено двумя путями: расчетным и на основании экспериментальных измерений. Первый путь является довольно сложным и громоздким. Он требует знания величин диэлектрической и магнитной проницаемости РПМ и в ряде случаев не обеспечивает достаточно высокой точности определения характеристик рассеяния этих материалов [1-3]. Второй путь состоит в проведении непосредственно экспериментальных измерений на полигонах с использо-

ванием специальных радиолокационных установок или безэховых камер [4-6]. Однако, экспериментальные данные, полученные в этих случаях, носят отрывочный характер для разных типов РПМ и в разных диапазонах длин волн. Кроме того, эти данные характеризуют только эффективную отражающую поверхность (ЭОП) каждого исследуемого РПМ на одной основной поляризации.

Целью статьи является экспериментальное исследование характеристик рассеяния объекта цилиндрической формы с РПМ, облучаемого сигналами на различных частотах и поляризациях, при совмещенном и разнесенном приемах.

Основной материал

При проведении измерений использовался экспериментальный комплекс, подробно описанный в [7, 8]. Данный комплекс позволяет проводить измерения коэффициентов отражения элементов поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) цели на 25 частотах в диапазоне от 8,0 до 10,4 ГГц с дискретностью изменения частоты 0,1 ГГц. Так как коэффициенты отражения цели пропорциональны ее ЭОП, то в дальнейшем при проведении дополнительной обработки результатов измерений получаем значения ЭОП σ в квадратных метрах или $\sqrt{\sigma}$ – в метрах.

При проведении экспериментальных измерений использовались два одинаковых металлических цилиндра с диаметром основания 150 мм и длиной образующей 300 мм. Цилиндры отличаются лишь тем, что у одного основание было покрыто РПМ первого типа (стекловолоконистая ткань с угольным наполнением), а у второго оба основания покрыты РПМ второго типа (каучуковая основа с наполнителем из карбонильного железа). Рассмотрим сначала изменения поляризационных характеристик рассеяния цилиндра при нанесении на него РПМ первого типа для совмещенного и разнесенного приема.

Данный РПМ наносился на основание цилиндра с различным количеством слоев, расстояние между которыми равнялось $\lambda/4$. Как показали проведенные экспериментальные исследования наибольший коэффициент поглощения этого материала на частоте 9160 МГц получен при нанесении на основание цилиндра пяти слоев РПМ. При изменении несущей частоты коэффициент поглощения такого покрытия резко уменьшается. Поэтому был сделан вывод о том, что данный поглощающий материал обладает ярко выраженными резонансными свойствами. Все следующие эксперименты по исследованию поляризационно-рассеивающих свойств цилиндра с данным поглотителем проведены для пяти слоев его нанесения на частоте 9160 МГц.

В результате проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных получены зависимости амплитудных элементов ПМР данного цилиндра от угла поворота в горизонтальной плоскости (β) для совмещенного с передающим приемного пункта ($\alpha = 0^\circ$) и вынесенного приемного пункта ($\alpha = 10^\circ$). Эти зависимости приведены на рис. 1 и 2. На всех рисунках приведены следующие обозначения: $S_{ГГ}$, $S_{ВВ}$ – модули основных элементов ПМР, выраженные в метрах; $S_{ВГ}$, $S_{ГВ}$ – модули кроссовых элементов ПМР, также выраженные в метрах. Первый индекс при S обозначает поляризацию антенны приемного канала, а второй – поляризацию излученного сигнала (В – вертикальная, Г – горизонтальная). Для удобства анализа на всех рисунках приведены зависимости при наблюдении цилиндра со стороны оснований в секторе углов $\beta = (180 \pm 20)^\circ$ (кривая 2 – цилиндр со стороны непокрытого основания, кривая 1 – цилиндр со стороны основания, покрытого РПМ), так как при этих ракурсах наблюдения в основном сказывается влияние РПМ.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что при наличии РПМ лепестковая структура реализаций элементов ПМР $S_{ГГ}$ и $S_{ВВ}$ существенно изменяется. Вместо центрального лепестка и первых двух боковых лепестков в интервале углов наблюдения $\Delta\beta = \pm 17^\circ$ на реализациях этих элементов видны только два достаточно широких лепестка, особенно для элемента $S_{ГГ}$. Для реализации элемента $S_{ВВ}$ при $\Delta\beta \approx 177^\circ$ присутствует также небольшой лепесток в провале между широкими лепестками. В целом же в пределах углов $\Delta\beta = \pm 17^\circ$ и примерно до углов $\Delta\beta = \pm 30^\circ$ существует незначительное различие в лепестковой структуре данных реализаций элементов ПМР по сравнению с реализациями соответствующих элементов ПМР, получаемых при отражении сигнала от основания цилиндра без покрытия. В этом диапазоне углов наблюдения (особенно при $\beta = 180^\circ$) происходит значительное уменьшение максимальных значений лепестков реализаций основных элементов ПМР при наличии РПМ. Проведенные расчеты показывают, что данное уменьшение составляет величину порядка (17...20) дБ. При увеличении отклонения углов наблюдения от угла $\beta = 180^\circ$ не происходит существенного уменьшения

коэффициента отражения, а в некоторых случаях он даже увеличивается. Это позволяет также сделать вывод о том, что данное РПМ обладает ярко выраженными резонансными свойствами.

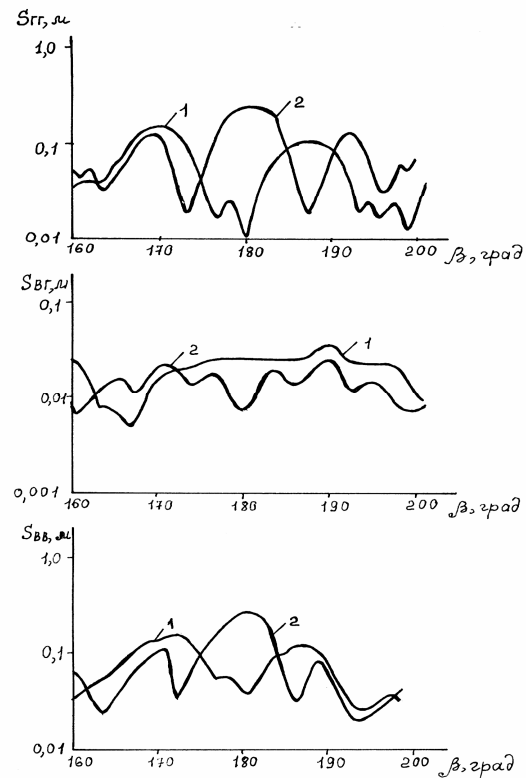


Рис. 1. Элементы ПМР цилиндра при $\alpha=0^\circ$

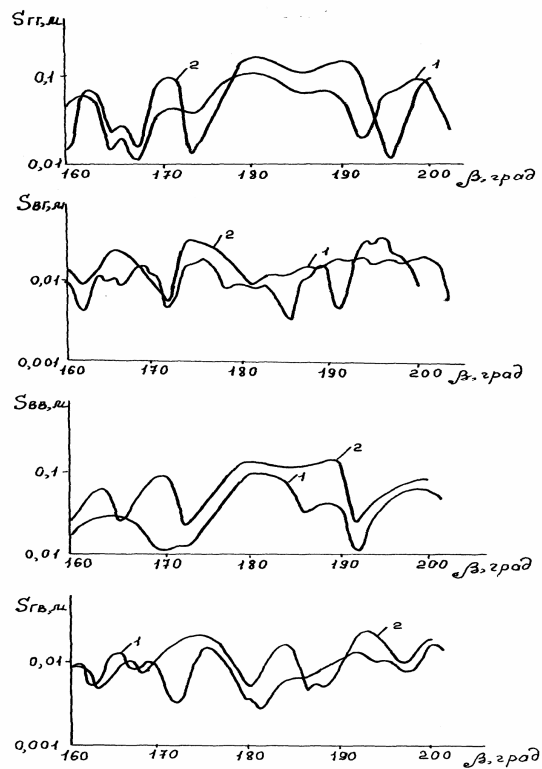


Рис. 2. Элементы ПМР цилиндра при $\alpha=10^\circ$

Кроссовая составляющая $S_{ВГ}$ при отражении сигнала от цилиндра с поглотителем в ракурсах на-

блюдения $\Delta\beta \approx 17^\circ$ сглажена, в отличии от соответствующей реализации при отражении сигнала от цилиндра без покрытия. При этом также наблюдается некоторое увеличение ее абсолютной величины при наличии поглотителя, что приведет к повышению радиолокационной заметности такой цели при использовании крессовой составляющей.

Для разнесенного приема при углах разноса $\alpha=10^\circ$ также характерно значительное искажение лепестковой структуры реализаций элементов ПМР на основных поляризациях и некоторое уменьшение их максимальных значений при наблюдении цилиндра со стороны основания, на которое нанесен поглотитель, по сравнению с его наблюдением со стороны непокрытого основания. Это уменьшение составляет порядка 3 дБ. Крессовые элементы ПМР S_{gv} и S_{vg} при наблюдении со стороны покрытого основания цилиндра несколько сглажены. Однако, различий в максимальных значениях данных элементов ПМР при отражении сигнала от непокрытых и покрытых оснований цилиндра на этих участках наблюдения практически не видно. Следует указать также, что при $\alpha = 10^\circ$ как при наблюдении цилиндра со стороны непокрытого, так и покрытого оснований происходит сдвиг реализаций элементов ПМР на угол $\beta \approx 5^\circ$.

Проанализируем изменения коэффициентов отражения широкополосного РПМ при облучении их узкополосными и многочастотными сигналами (МЧС). Как было указано выше, в качестве широкополосного использовался РПМ второго типа, который наносился на основания цилиндра. При наличии на цели РПМ этого типа амплитуда отраженного от нее узкополосного сигнала будет меньше, чем в случае отсутствия РПМ. При этом величина данного уменьшения будет определяться несущей частотой излучаемых узкополосных сигналов.

Для исследования поглощающих свойств данного типа РПМ были проведены экспериментальные измерения реализаций амплитуд отраженных узкополосных сигналов при горизонтальной поляризации на 2-х разнесенных фиксированных частотах в диапазоне частот (8,0-10,0) ГГц.

На рис. 3, 4 в качестве примера представлены участки диаграмм обратного вторичного отражения цилиндра, измеренные для покрытого РПМ второго типа (кривая 1) и непокрытого (кривая 2) его оснований соответственно на частотах 8,1; 10,0 ГГц. Проведенный анализ данных рисунков показывает, что применение данного РПМ приводит к уменьшению амплитуды отраженных сигналов на (6...7) дБ, если несущая частота составляет 8,0 ГГц. При этом такое уменьшение амплитуды отраженного сигнала сохраняется при отклонении направления облучения РПМ от нормали к нему ($\beta = 180^\circ$) на угол до 30° . Данное уменьшение амплитуды отраженного сигнала приводит к уменьшению дальности обнаружения целей с заданными показателями качества в 1,2 раза, а ошибки измерения координат целей увеличиваются в два раза. При повышении несущей частоты излучаемого сигнала

до 10 ГГц сектор углов наблюдения РПМ относительно $\beta = 180^\circ$, при котором уменьшение амплитуды отраженного сигнала находится в указанном диапазоне, резко сокращается до $\sim 10^\circ$. При значительных отклонениях углов наблюдения от 180° сектора, в частности при угле наблюдения $\beta = 90^\circ$ наличие РПМ практически не влияет на величину амплитуды отраженного сигнала.

В данном случае наличие РПМ приводит к изменению лепестковой структуры этих реализаций, а именно к незначительному расширению ширины лепестков (в 1,1...1,2 раза). Из-за этого частота флуктуаций амплитуд принятых сигналов будет несколько меньше (в 1,1...1,2 раза).

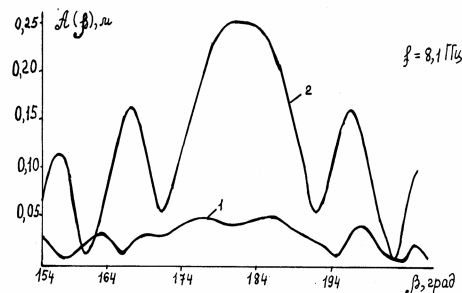


Рис. 3 Участки диаграммы амплитуды цилиндра с РПМ второго типа, $f=8,1 \text{ ГГц}$

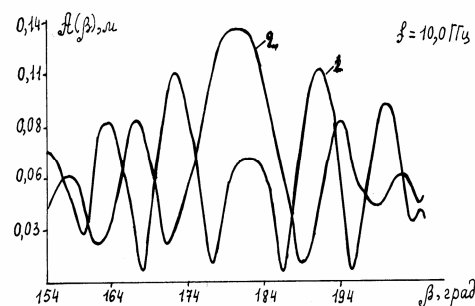


Рис. 4 Участки диаграммы амплитуды цилиндра с РПМ второго типа, $f=10,0 \text{ ГГц}$

Наличие на цели РПМ при облучении ее МЧС приводит к тому, что различные частотные составляющие такого сигнала дополнительно искажаются. Эти искажения, как и в случае с узкополосным сигналом приводят к уменьшению отношения сигнал/шум, а следовательно к уменьшению дальности обнаружения целей и к увеличению ошибок измерения координат. Величина уменьшения отношения сигнал/шум в данном случае будет определяться не только несущей частотой, но и шириной спектра МЧС.

Проведенные исследования отражательных характеристик второго типа РПМ при облучении его МЧС с шириной спектра порядка 2 ГГц показали, что его применение может приводить к уменьшению отношения сигнал/шум на (3...4) дБ, если несущая частота составляет 9,0 ГГц. Такое уменьшение отношения сигнал/шум приводит к уменьшению дальности обнаружения целей с заданными показателями качества в 1,1 раза, а ошибки измерения координат увеличиваются в 1,5 раза. Увеличение несущей частоты

или расширение спектра МЧС будут приводить к увеличению отношения сигнал/шум. Это видно из рис. 5, на котором изображены зависимости максимальной амплитуды сигналов, отраженных от покрытого вторым типом РПМ (кривая 1) и непокрытого (кривая 2) оснований цилиндров от частоты.

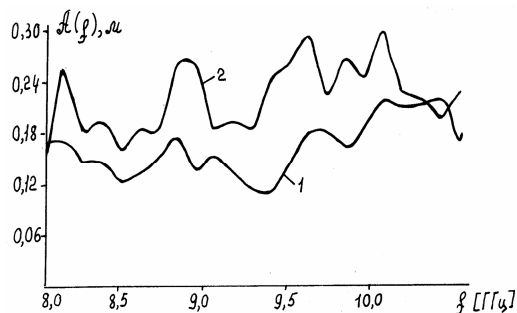


Рис. 5. Частотная зависимость амплитуды для РПМ второго типа

Для частот свыше 10 ГГц отличия кривой 1 от кривой 2 незначительные. Поэтому частотные составляющие, попадающие в этот частотный диапазон практически искажаться не будут. Проведенные исследования показали, что приведенные выше уменьшение отношения сигнал/шум сохраняется и при отклонении направления облучения РПМ от нормали к нему ($\beta = 180^\circ$) на угол до 30° . При больших отклонениях наличие РПМ практически не влияет на величину отношения сигнал/шум.

Аналогичные результаты получаются при анализе кроссовой составляющей отраженного сигнала от цилиндра с данным РПМ.

Выводы

Таким образом, при нанесении на плоские участки цилиндра РПМ резонансного типа происходит искажение лепестковой структуры реализации амплитуд отраженных от этих участков сигналов на основных и кроссовых поляризациях как при совмещенном, так и при разнесенном приеме, а также некоторое уменьшение значений амплитуд отраженных сигналов на основных поляризациях. Использование широкополосных МЧС позволяет

повысить радиолокационную заметность цели, выполненных с применением РПМ. При этом выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с использованием узкополосных сигналов может достигать (2...4) дБ при наличии на цели РПМ первого типа и (3,5...5,5) дБ при наличии на цели РПМ второго типа. Увеличение несущей частоты сигнала при расширении его спектра приводит к еще большему энергетическому выигрышу по сравнению с применением узкополосного сигнала. Результаты приведенных исследований могут быть использованы при проектировании и разработке новых РЛС.

Список литературы

1. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Сов. радио, 1962. – 234 с.
2. Сиренко О.К., Сухаревский И.В., Сухаревский О.И., Яшин Н.П. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Под ред. О.К. Сиренко – Х.: Крок, 2000. – 242 с.
3. Кристин мл., Маффет. Оценка радиолокационного поперечного сечения тел простой геометрической формы. ТИИЭР. – 1965. – Т. 53. – № 8. – С. 1115 - 1126.
4. Блексмит мл., Хайатт Введение в методы измерения радиолокационного поперечного сечения цели. ТИИЭР. – 1965. – Т. 53. – №8. – С. 1055 - 1057.
5. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин и др.; под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1987. – 236 с.
6. Ягольщикова С., Сумнин А., Нестеров С. Опыт исследования "невидимок" // Военно-промышленный курьер. – 2004. – С. 105 - 115.
7. Казаков Е.Л., Кравченко А.И., Николаенко С.В. Экспериментальный измерительный комплекс для определения характеристик рассеяния радиолокационных целей в широком диапазоне частот. // Наука и оборона. – К.: 1994. – Вып. 3 – С. 111 - 116.
8. Распознавание целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах. / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев: Под ред. Е.Л. Казакова – Х.: ХУВС, 2015. – 459 с.

Надійшла до редколегії 19.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук В.М. Биков, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-РОЗСІЮЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЦІЛІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ З ПОГЛИНАЮЧИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Є.Л. Казаков, О.Є. Казаков, В.М. Решетник

Проведена експериментальна оцінка поляризаційно-розсіюючих властивостей циліндричної цілі, на якій нанесен резонансний поглинаючий матеріал, при сумісному та рознесенному прийомі. Розглянути результати експериментальних вимірювань коефіцієнтів відбиття від циліндричної цілі покритої широкопозитивним поглинаючим матеріалом, при її опроміненні вузькополосними сигналами на різних поляризаціях.

Ключові слова: радіолокаційні сигнал та, ціль, радіопоглинаючий матеріал, поляризаційна матриця розсіювання.

EXPERIMENTAL STUDY OF POLARIZATION-SCATTERING PROPERTIES OF RADAR TARGET OF CYLINDRICAL SHAPE WITH ABSORBING MATERIALS

E.L. Kazakov, A.E. Kazakov, V.M. Rechetnik

Experimental evaluation of a polarization-scattering properties of a cylindrical target, which caused a resonant absorbing material and when combined exploded reception. The results of the experimental measurements of reflection coefficients from cylindrical targets broadband covered with absorbent material at its irradiation by narrowband signals at different polarizations.

Keywords: radar signal, radar, target, radar-absorbing material, the polarization scattering matrix.

УДК 519.87:316.458.6

В.Б. Кононов, А.М. Науменко, В.С. Михаленко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АМПЛІТУДНО-MOДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ

В статті описуються методи та засоби вимірювання параметрів амплітудно-модульованих сигналів в системах управління радіотехнічних зразків озброєння та військової техніки Збройних Сил України, які залучаються до проведення антитерористичної операції.

Ключові слова: амплітудно-модульовані сигнали, метрологічне забезпечення.

Вступ

Постановка задачі. Однієї із задач при повірки силами виїзної метрологічної ремонтно-відновлюваної групи озброєння та військової техніки радіолокаційної станції підрозділу радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, що дислокується в зоні проведення антитерористичної операції, є визначення коефіцієнта амплітудної модуляції. Для цього необхідно виміряти мінімальне та максимальне значення модульованого сигналу. Що визначає актуальність питання визначення методів та засобів вимірювання параметрів амплітудно-модульованих (АМ) сигналів в системах управління зразків озброєння та військової техніки військових частин та підрозділів радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, що залучається до проведення антитерористичної операції, описом якого й присвячена стаття.

Аналіз літератури. Принципи й організаційні основи метрологічного забезпечення, а також роль й місце метрологічного забезпечення Збройних Сил України, з урахуванням досвіду проведення антитерористичної операції, викладено в статті [1] та в наказах [4, 5]. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення зразків озброєння та військової техніки військ (сил) надана в статті [2]. Види та методи оцінювання результатів вимірювання засобами вимірювальної техніки викладено в статті [3]. Нажаль в літературі [1-5] питання, які пов'язані з описом методів та засобів вимірювання параметрів амплітудно-модульованих (АМ) сигналів в системах управління зразків озброєння та військової техніки військових частин та підрозділів радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, що залучається до проведення антитерористичної операції не розглядалися.

Метою статті є опис методів та засобів вимірювання параметрів амплітудно-модульованих (АМ) сигналів в системах управління зразків озброєння та

військової техніки військових частин та підрозділів радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, які залучаються до проведення антитерористичної операції.

Основний матеріал

Обслуги метрологічних ремонтно-відновлювальних груп, які залучаються до повірки озброєння та військової техніки радіолокаційної станції підрозділу радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, що дислокується в зоні проведення антитерористичної операції, стикаються із необхідністю виміряти мінімальне та максимальне значення модульованого сигналу. Це можна зробити при обробці інформації про сигнал обвідної. Обвідна виділяється з високочастотного АМ сигналу шляхом його детектування – процесу, метою якого є відновлення сигналу обвідної, відбитого в змінах амплітуди модульованого коливання. Детектування – процес, зворотній модуляції. Тому, перш за все, необхідно визначитися із методами та засобами вимірювання параметрів АМ сигналів в системах управління зразків озброєння та військової техніки військових частин та підрозділів радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, що залучається до проведення антитерористичної операції.

Одним із існуючих методів вимірювання параметрів АМ сигналів є метод вибірки-зберігання. Для низьких частот і при малому рознесенні частот несучого і моделюючого коливань доцільно використовувати демодулятори амплітудно-модульованих коливань (ДАМК), побудовані на основі пристрою вибірки-зберігання (ПВЗ) (рис. 1). До складу схеми входять пристрій вибірки-зберігання, одно вібратор ОВ, екстрематор Ек, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), процесор (Пр) та блок відображення інформації БВІ.

З'ясуємо принцип дії демодулятора, користуючись осцилограмами, наведеними на рис 2.

Якщо в моменти екстремуму АМ коливань проводити перетворення (вибірку) амплітудного значення з запам'ятовуванням цього значення до настання

наступного екстремуму, то на виході ДАМК буде формуватися обвідна АМ коливання. Швидкодія ПВЗ повинна бути достатньо великою для того, щоб за час вибірки відбулася лише незначна зміна амплітудного значення вихідного сигналу. Час вибірки визначається тривалістю вихідного імпульсу одновибратора, який запускається переднім (або заднім) фронтом вихідного імпульсу екстрематора.

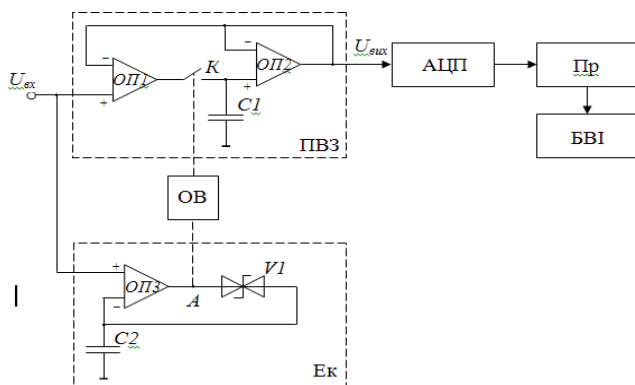


Рис. 1. Схема модулометра, побудованого на основі пристрою вибірки-зберігання.

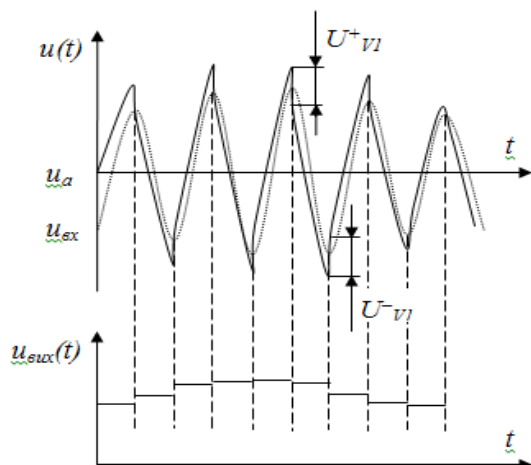


Рис. 2. Часові діаграми, що ілюструють роботу пристрою вибірки-зберігання

Екстрематор є підсилювачем із нелінійним від'ємним зворотним зв'язком (ВЗЗ), що запам'ятовує значення вхідного сигналу у момент розриву цього зв'язку. Дійсно, при відкритому стабілізаторі 1 ланцюг ВЗЗ операційного підсилювача ОПЗ замкнений, при цьому напруга на конденсаторі C2 відстежує напругу на вході. У точці екстремуму (рис. 2) різниця потенціалів на входах ОПЗ змінює знак, внаслідок чого для замикання ланцюга ВЗЗ напруга на виході ОПЗ стрибкоподібно змінюється по величині і знаку. Величина стрибка напруги дорівнює напрузі пробію стабілітрона V1. Момент формування стрибка з високою точністю відповідає екстремуму вхідного коливання. Вихідна ступінчаста напруга пристрою вибірки-зберігання подається на вхід АЦП, в якому виконуються операції дискретизації, квантування та кодування. За кодами цієї на-

пруги процесор Пр обчислює коефіцієнт амплітудної модуляції сигналу, а результати цих обчислень виводяться блоком відображення інформації БВІ. Залежно від вимог до точності і швидкодії схеми вузли ПВЗ, Об, Ек, АЦП та Пр можуть мати різні варіанти виконання.

Метод вибірки-зберігання використовується в цифрових амплітудних модулометрах, за допомогою яких здійснюється вимірювання параметрів АМ сигналів. Цифрові амплітудні модулометри засновані на вимірюванні максимального $U_{\text{макс}}$ і мінімального $U_{\text{мін}}$ значень модульованого сигналу й обчислення за цими значеннями глибини (коефіцієнта) модуляції за формулою

$$\mu = \mu_{\text{в}} = \mu_{\text{н}} = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мін}}}{U_{\text{макс}} + U_{\text{мін}}} 100\%, \quad (1)$$

де $\mu_{\text{в}} = \frac{U_{\text{макс}} - \bar{U}}{\bar{U}} 100\%$, $\mu_{\text{н}} = \frac{\bar{U} - U_{\text{мін}}}{\bar{U}} 100\%$ - ко-

ефіцієнти амплітудної модуляції "вгору" та "вниз"; $U_{\text{макс}}$, $U_{\text{мін}}$ - відповідно максимальне і мінімальне значення АМ сигналу $u(t)$ за період обвідної T_0 .

Максимальне й мінімальне значення АМ сигналу можуть бути виміряні за «вибірковими» миттєвими значеннями та методом сканування.

Методу вимірювання за миттєвими «вибірковими» значеннями властиві кілька недоліків: обмежена верхня межа частоти несучої; обмежена нижня межа коефіцієнта модуляції й амплітуди несучої; наявність методичних похибок за рахунок нелінійних перекручень модулюючого сигналу; складність схемної реалізації. Крім того, він не забезпечує вимірювання фазового зсуву АМ сигналу. Усунути деякі зазначені недоліки дозволяє цифровий метод вимірювання параметрів АМ сигналів за допомогою їх сканування, причому можливо рівномірне й нерівномірне сканування.

Метод з використанням нерівномірного сканування має досить високу швидкість й дозволяє відмовитися від використання обчислювальних вузлів приладу. Разом з цим він забезпечує лінійну залежність коефіцієнта модуляції від числа рівнів сканування, що, в свою чергу, знижує завадозахищеність приладу.

Розглянемо вимірювачі коефіцієнта модуляції за «вибірковими» миттєвими значеннями. Запишемо вираз для АМ сигналу

$$u(t) = U_{\text{нес.макс}} (1 + \mu \sin \Omega t) \sin \omega t, \quad (2)$$

де: $u(t)$ - амплітудно-модульований сигнал; $U_{\text{нес.макс}}$ - амплітуда несучого сигналу; μ - коефіцієнт (глибина) модуляції; $\Omega = 2\pi F$ - частота сигналу обвідної (який модулює); $\omega = 2\pi f$ - частота несучої частоти.

Умова рівності нулю початкових фаз модулюючого та несучого сигналів не змінює сутність ме-

тоту, що розглядається, але цей факт значно зменшує громіздкість запису наступних виразів. Тому всі подальші розрахунки виконані з урахуванням цього. Миттєві значення АМ сигналу $u(t)$ вимірюють у точках дискретизації

$$t_q = \left[(2q - 1) / 2 \right] (\pi / \omega), \quad (q = 1, 2, \dots, 2n), \quad (3)$$

де $n = (\omega / \Omega) \gg 1$.

В ці моменти

$$u(t_q) = U_{\text{нес.макс}} \left(1 + \mu \sin \frac{2q - 1}{2} \cdot \frac{\pi}{n} \right) (-1)^q \quad (4)$$

перетворюють у цифровий код

$$N_q = k_u u(t_q),$$

де k_u – коефіцієнт пропорційності.

Цифрові коди сусідніх миттєвих значень N_q та $N_{(q+1)}$ по чергово порівнюються один з одним, доки не буде виявлені максимальне та мінімальне значення:

$$N_{\text{макс}} = \max |N_q| = k_u U_{\text{нес.макс}} \left[1 + \mu \sin(\pi / 2 + \delta_1) \right] \quad (5)$$

$$N_{\text{мін}} = \min |N_q| = k_u U_{\text{нес.макс}} \left[1 - \mu \sin(\pi / 2 + \delta_2) \right], \quad (6)$$

де δ_1 та δ_2 – фазові похибки визначення моментів, які відповідають максимальному та мінімальному значенням напруги обвідної. Сумуючи та віднімаючи $N_{\text{макс}}$ та $N_{\text{мін}}$, знаходимо

$$N_+ = N_{\text{макс}} + N_{\text{мін}} = 2k_u U_{\text{нес.макс}} (1 + \delta N_+); \quad (7)$$

$$N_- = N_{\text{макс}} - N_{\text{мін}} = 2k_u \mu U_{\text{нес.макс}} (1 + \delta N_-). \quad (8)$$

У виразах (7) та (8) δN_+ та δN_- – відносні методичні похибки визначення кодів N_+ та N_- , причому

$$|\delta N_+| = \mu |\cos \delta_1 - \cos \delta_2| / 2 \cong \mu \cdot |\delta_1^2 - \delta_2^2| / 4; \quad (9)$$

$$|\delta N_-| = 1 - (\cos \delta_1 + \cos \delta_2) / 2 \cong (\delta_1^2 + \delta_2^2) / 4. \quad (10)$$

Через те, що при переході від однієї точки квантування, ωt_q , до наступної, $\omega t_{(q+1)}$, аргумент синуса модулюючої змінюється на величину πn , тобто $(\omega t_{(q+1)} / n - \omega t_q / n) = \pi / n$, справедливі нерівності $|\delta_1| - \pi / 2n, |\delta_2| \leq \pi / 2n$. Тоді відносні методичні похибки мають значення

$$|\delta N_+| \leq \frac{1}{16} \mu \left(\frac{\pi^2}{n^2} \right); \quad (11) \quad |\delta N_-| \leq \frac{1}{8} \mu \left(\frac{\pi^2}{n^2} \right). \quad (12)$$

Звичайно n – величина досить велика ($n \gg 1$), тому $|N_+| \ll 1$ та $|N_-| \ll 1$. Завдяки цьому методичними похибками в визначенні кодів N_+ та N_- можна знехтувати (вирази (7) та (8)).

Амплітуда несучої (без модуляції) та коефіцієнт модуляції обчислюються за визначеними кодами N_+ та N_- :

$$U_{\text{нес.макс}} = N_+ / 2k; \quad (13)$$

$$\mu = N_- / N_+. \quad (14)$$

Їх відносні методичні похибки

$$\delta U = \delta N_+; \quad (15)$$

$$\delta \mu \leq |\delta N_-| + |\delta N_+|. \quad (16)$$

В основу побудови амплітудного цифрового модулометра покладені співвідношення (9) – (16). Його структурна схема наведена на рис. 3.

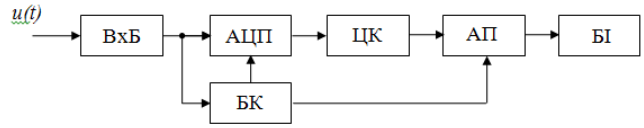


Рис. 3. Загальна структурна схема цифрового амплітудного модулометра

Амплітудно-модульований сигнал $u(t)$ через вхідний блок потрапляє на блок керування та потенційний вхід АЦП. Блок керування виділяє моменти часу, відповідні максимальним значенням напруги несучої $u(t_q)$ та запускає в ці моменти АЦП. Останній перетворює миттєві значення напруги в цифрові коди N_q , які потрапляють до цифрового компаратора, де по чергово порівнюються один з одним, доки серед них не буде визначений найбільший та найменший. Отримані таким чином значення $N_{\text{макс}}$ та $N_{\text{мін}}$ вводяться до арифметичного пристрою, де вони підлягають цифровій обробці відповідно виразів (9), (10) та (14).

Нижній діапазон вимірювань коефіцієнта модуляції визначається чутливістю та дискретністю АЦП, причому, чим менша амплітуда несучої, тим вища повинна бути чутливість перетворювача $\Delta U_{\text{п}}$, що обирається з умови $\Delta U_{\text{п}} \leq \mu (U_{\text{макс}})_{\text{мін}}$, де $(U_{\text{макс}})_{\text{мін}}$ – мінімально можлива амплітуда несучої.

Так, для $\mu = 0,001$ та $(U_{\text{макс}})_{\text{мін}} = 10\text{мВ}$ одержимо $\Delta U_{\text{п}} \leq \mu (U_{\text{макс}})_{\text{мін}} \Delta U_{\text{п}} \leq 0,1\text{мВ}$. Існуючі АЦП такої чутливості не забезпечують, і тому досліджуваний сигнал $u(t)$ необхідно підсилити.

Коефіцієнт підсилення підсилювача $k_{\text{п}}$ варто обирати з урахуванням верхньої межі роботи АЦП, яка в АЦП на напівпровідникових приладах може бути забезпечена

$$U_{\text{п.макс}} = 10\text{мВ}.$$

Тоді чутливість перетворювача

$$\Delta U_{\text{п}} \leq \mu k_{\text{п}} (U_{\text{макс}})_{\text{мін}} \approx 0,001 \cdot 10 = 0,01\text{В}. \quad (17)$$

Приблизно такого самого порядку повинна бути й дискретність перетворювача, яку дозволяють забезпечити відомі схеми перетворювачів. Таким чином, при

використанні високоточних АЦП та ЦК амплітудний цифровий модулометр дозволяє забезпечити високі метрологічні характеристики.

Розглянутому вимірювачу властивий певний перелік недоліків: обмежена верхня межа несучої частоти; обмежена нижня межа коефіцієнта модуляції й амплітуди несучої; наявність методичних похибок за рахунок нелінійних перекручень модулюючого сигналу; складність схемної реалізації. Крім того, він не забезпечує вимірювання фазового зсуву АМ сигналу. Усунути в якийсь мірі зазначені недоліки дозволяє цифровий метод вимірювання параметрів АМ сигналів їх скануванням, причому можливо рівномірне й нерівномірне сканування.

Висновки

1. В статі описано методи та засоби вимірювання параметрів амплітудно-модульованих (АМ) сигналів в системах управління зразків озброєння та військової техніки військових частин та підрозділів радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, що залучається до проведення антитерористичної операції.

2. Метод вибірки-зберігання використовується в цифрових амплітудних модулометрах, за допомогою яких здійснюється вимірювання параметрів АМ сигналів на зразках озброєння та військової техніки в зоні проведення антитерористичної операції.

3. Максимальне й мінімальне значення АМ сигналу можуть бути виміряні за «вибірковими» миттєвими значеннями та методом сканування. На жаль цьому методу притаманні певні недоліки, а саме: обмежена верхня межа частоти несучої; обмежена нижня межа коефіцієнта модуляції й амплітуди несучої; наявність методичних похибок за рахунок нелінійних перекручень модулюючого сигналу; складність схемної реалізації. Крім того, він не забезпечує вимірювання фазового зсуву АМ сигналу.

4. Усунути деякі зазначені недоліки дозволяє цифровий метод вимірювання параметрів АМ сигналів за допомогою їх скануванням, причому можливо рівномірне й нерівномірне сканування.

5. Метод з використанням нерівномірного сканування має досить високу швидкодію й дозволяє

відмовитися від використання обчислювальних вузлів. Разом з цим він забезпечує лінійну залежність коефіцієнта модуляції від числа рівнів сканування, що, в свою чергу, знижує завадозахищеність приладу.

6. В статі описано амплітудно цифровий модулометр, який дозволяє забезпечити високі метрологічні характеристики при вимірюванні. Нажаль йому притаманні певні недоліки: обмежена верхня межа несучої частоти; обмежена нижня межа коефіцієнта модуляції й амплітуди несучої; наявність методичних похибок за рахунок нелінійних перекручень модулюючого сигналу; складність схемної реалізації. Крім того, він не забезпечує вимірювання фазового зсуву АМ сигналу.

7. Усунути в певній мірі зазначені недоліки дозволяє цифровий метод вимірювання параметрів АМ сигналів їх скануванням, причому можливо рівномірне й нерівномірне сканування.

Список літератури

1. Кононов В.Б., Копашинський С.А., Коваль О.В. Метрологічне забезпечення у сфері оборони в умовах проведення антитерористичної операції // Зб. наук. пр. ХНУПС 2017.-№ 4(53)-С.144-147.
2. Кононов В.Б. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення //Авиационно-космическая техника и технология.— Харків: НАУ ХАИ—2011.-№ 8 (85) -С.231 – 234.
3. Кононов В.Б. Види та методи оцінювання результатів вимірювання засобами вимірювальної техніки // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. ХУПС. – Вип.5 (95). – Харків, 2011. – С. 45–49.
4. Наказ Міністра оборони України від 15.12.2006 № 731 “Про затвердження нормативних документів з метрології та метрологічної діяльності.”
5. Наказ начальника Центрального управління метрології і стандартизації “Про затвердження Керівництва з організації виробничої діяльності військових метрологічних лабораторій в Міністерстві оборони України та Збройних Силах України” від 14.05.2007 № 2.

Надійшла до редколегії 19.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Більчук, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

В.Б. Кононов, А.Н. Науменко, В.С. Михаленко

В статье описываются методы и средства измерения параметров амплитудно-модулированных сигналов в системах управления радиотехнических образцов вооружения и военной техники Вооружённых Сил Украины, которые задействуются в проведении антитеррористической операции.

Ключевые слова: амплитудно-модулированные сигналы, метрологическое обеспечение.

METHODS AND DEVICES OF MEASUREMENT OF PARAMETERS OF AMPLITUDE-MODULATED SIGNALS

V.B. Kononov, A.M. Naumenko, V.S. Mikhalenko

The article describes methods and means for measuring the parameters of amplitude-modulated signals in control systems of radio engineering models of weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine, which are involved in the conduct of an anti-terrorist operation.

Keywords: amplitude-modulated signals, metrological support.

УДК 519.87:316.458.6

О.А. Кононова, В.С. Рак, С.П. Браславець

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОПИС ПРИСТРОЮ ТЕСТУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ НА ЗРАЗКАХ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

В статті описується загальна та структурна схеми пристрою сумісного з ІВМ комп'ютером, за допомогою якого здійснюється тестування ІМС на зразках озброєння та військової техніки з урахуванням досвіду проведення антитерористичної операції.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, озброєння та військова техніка, інтегральні мікросхеми.

Вступ

Постановка задачі. Метрологічне забезпечення бойових дій в умовах виконання завдань захисту Держави в антитерористичній операції на Сході України полягає у підтриманні у бойовій готовності зразків озброєння та військової техніки. В зоні проведення антитерористичної операції ці питання покладаються на обслуговування метрологічних ремонтно-відновлювальних груп, яка відновлює системи управління на зразках озброєння та військової техніки. Архітектурно системи управління зразків озброєння та військової техніки складаються із мікросхем, основними із яких є інтегральні. Виконуючи відновлення систем управління на зразках озброєння та військової техніки, обслуга метрологічних ремонтно-відновлювальної групи, здійснює контроль на працездатність, а також відповідність технічним умовам і параметрам ДСТУ інтегральних мікросхем (ІМС).

При цьому, необхідно розуміти, що несправність якої-небудь однієї деталі може викликати вихід з ладу інших деталей, вузлів, а можливо, і всього зразка озброєння та військової техніки в цілому. Тому контроль та визначення параметрів ІМС обслуговування ремонтно-відновлювальних груп на зразках озброєння та військової техніки, якій здійснюється за допомогою відповідного пристрою, є актуальною науково-прикладною задачею, описом якого й присвячена стаття.

Аналіз літератури. Принципи й організаційні основи метрологічного забезпечення, а також роль й місце метрологічного забезпечення Збройних Сил України, з урахуванням досвіду проведення антитерористичної операції, викладено в статті [1] та в наказах [4, 5]. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення зразків озброєння та військової техніки військ (сил) надана в статті [2]. Види та методи оцінювання результатів вимірювання засобами вимірювальної техніки викладено в статті [3]. Нажаль

в літературі [1-5] питання, які пов'язані з описом пристрою за допомогою якого здійснюється контроль та визначення параметрів ІМС на зразках озброєння та військової техніки в зоні проведення антитерористичної операції не розглядалися.

Метою статті є опис пристрою за допомогою якого здійснюється контроль та визначення параметрів ІМС на зразках озброєння та військової техніки в зоні проведення антитерористичної операції.

Основний матеріал

Обслуги метрологічних ремонтно-відновлювальних груп, які залучаються до проведення антитерористичної операції, здійснюють відновлення систем управління на зразках озброєння та військової техніки за допомогою пристрою, що підключає до ІВМ- сумісного комп'ютера, призначено для тестування й визначення типу ІМС методом сигнатурного аналізу ІМС ТТЛ (серії ДО 155, Д0555, Д0531, Д0 1531) і КМОП (серії Д0176, Д0561, Д01561), а також визначення логіки, що дозволяє робити перевірку всіх статичних режимів роботи цих ІМС.

Загальна структурна схема наведена на рис. 1.

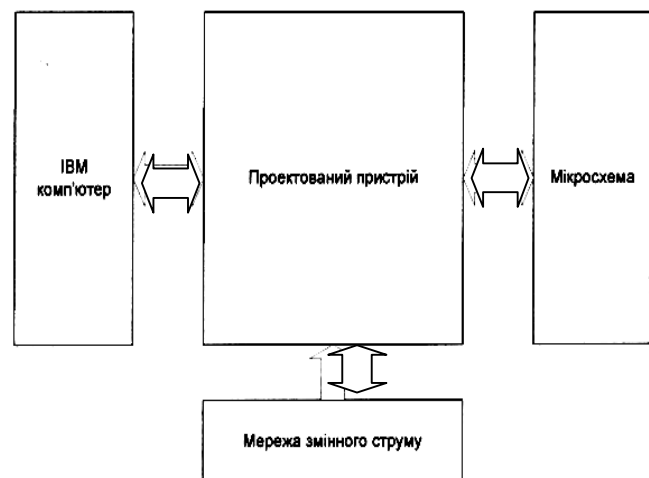


Рис. 1. Загальна структурна схема пристрою сумісного з ІВМ комп'ютером, за допомогою якого здійснюється тестування ІМС на зразках озброєння та військової техніки

Живлення приладу здійснюється від мережі змінного струму ~220В. Обмін даними між пристроєм і комп'ютером здійснюється за допомогою порту принтера LPT. Мікросхема вставляється в колодку, розташовану на корпусі пристрою за допомогою якого здійснюється тестування ІМС. LPT-порт комп'ютера в нормальному режимі являє собою паралельний регістр, що має 12 ліній на вихід і 5 ліній на вхід.

Оскільки ІМС мають найрізноманітнішу структуру, то цього явно недостатньо для тестування ІМС, що мають, наприклад, 6 входів і 16 виходів (D0155ИДЗ), або 21 вхід й 1 вихід (D0155КП1). В

наслідок чого, здійснюється нарощування розрядності LPT- порту, шляхом введення вхідних запам'ятовувальних регістрів, вихідних мультиплексерів і дешифратора, якій здійснює управління записом у регістри й зчитування даних за допомогою мультиплексерів відповідно. Застосування в цьому випадку вихідних мультиплексерів, а не регістрів, обумовлено спрощенням схеми, й можливо завдяки статичному характеру сигналів на виходах повіряємої ІМС. Стандартний LPT- порт комп'ютера має на виході TTL-рівні. Структурна схема пристрою представлена на рис. 2.

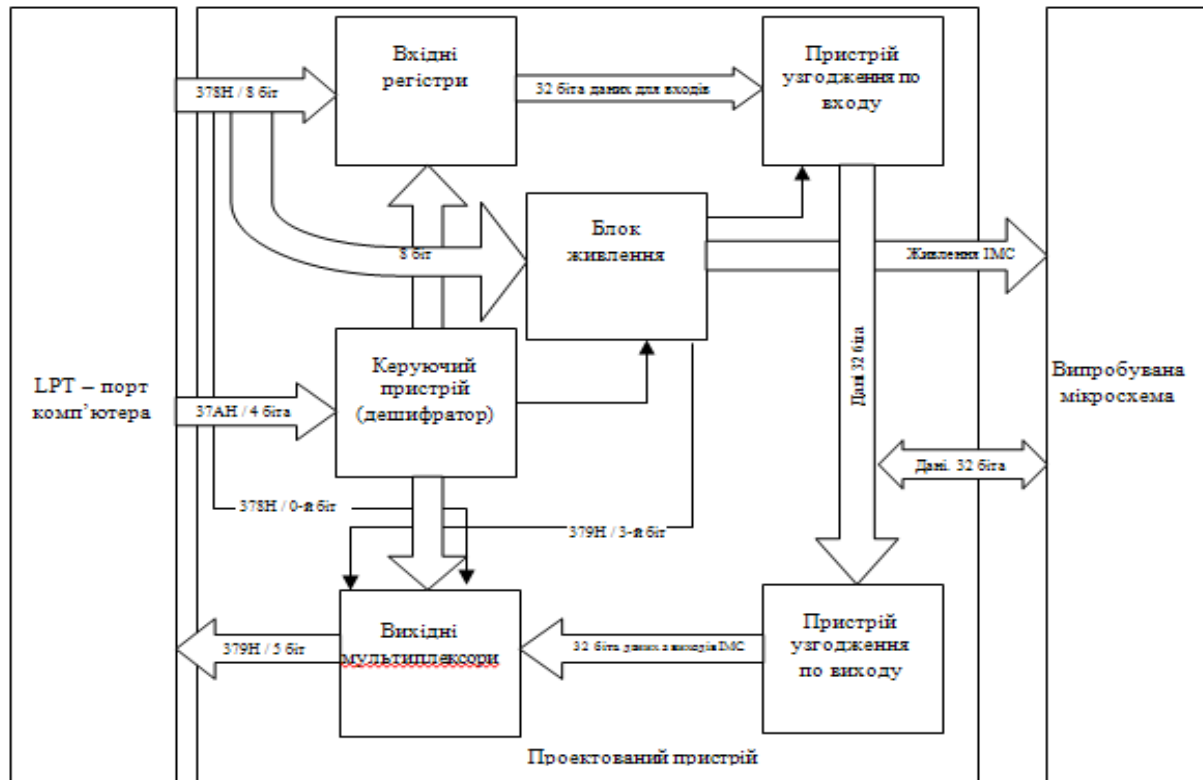


Рис. 2. Структурна схема пристрою сумісного з IBM комп'ютером, за допомогою якого здійснюється тестування інтегральних мікросхем на зразках озброєння та військової техніки

Вхідні регістри що запам'ятовують виставлені значення, призначені для подачі на вхід мікросхеми. Вихідні мультиплексори призначені для зчитування сигналів з виходів мікросхеми. В пристрою використовуються 32 розряди (оскільки максимальне число виходів мікросхем TTL - і КМОП-логіки не перевищує 32). Число вхідних і вихідних ліній LPT-порту обмежено. Найбільш ефективним і зручним для програмування є використання 8-ми вихідних ліній LPT-порту для запису даних у регістри й 4-х вхідних ліній LPT-порту для зчитування даних з мультиплексерів. Для запису даних знадобляться чотири 8-розрядних регістри, для зчитування даних - чотири двох входових 4-розрядних мультиплексера. Оскільки вхідні й вихідні лінії розділені (для входу й виходу використовуються різні фізичні лінії

LPT-порту), то мультиплексори адресуються паралельно регістрам (для адресації знадобиться 4-і лінії замість 8-ми). При цьому, для управління вибіркою входів мультиплексерів використовується один біт LPT-порту на вихід (0-й біт порту 378H). У блоці живлення використовуються ще три 8- розрядних регістри (2 на управління й 1 на комутацію), які використовують ще 3 адресні лінії. Таким чином, для адресації 7-ми регістрів існує 3 додаткові лінії LPT-порту (37AH) на виході (адресуємі за допомогою дешифратора 3x8) і одна лінія порту 37AH вихід якої використовується для управління записом у регістри.

Пристрій призначений як для тестування мікросхем TTL, так і для тестування мікросхем КМОП. Крім вхідних запам'ятовувальних регістрів існує

пристрій погодження по входу (для перетворення вихідних ТТЛ-уровнів регістрів у рівні повіряємої ІМС (КМОП або ТТЛ, залежно від серії). Зчитування даних з виходів повіряємої ІМС, перед входами мультиплексорів здійснюється пристроєм узгодження по виходу (перетворення вихідних КМОП або ТТЛ сигналів у ТТЛ-рівні).

При визначенні типу ІМС для кожного розряду задалегідь невідомо, чи підключений до нього вихід мікросхеми є входом або виходом. Тому струм, що протікає через її вихід, обраний таким чином, щоб забезпечити максимально можливий вхідний струм для перевірки серії. При цьому струм виходу деяких ІМС менше вхідного струму. Тому при визначення типу ІМС, необхідно враховувати розходження вхідних/вихідних струмів для ІМС КМОП і ТТЛ серій.

Блок живлення пристрою забезпечує необхідне живлення апаратної частини пристрою. Величини напруги й максимально споживаного струму в ланцюзі навантаження встановлюються програмно. Регулювання напруги й струму здійснюється для того, щоб мати можливість виміряти мінімальну напругу живлення й максимально споживаний струм для кожного конкретного екземпляра ІМС.

8-розрядні регістри забезпечують східчасте регулювання в $2^8=256$ значень напруги. Таким чином, при опорній напрузі в 9в, крок дорівнює $9в/256 \approx 0.04в$, цього цілком достатньо для регулювання напруги живлення ІМС. Так як максимально припустимий споживаний мікросхемою струм обраний $\sim 250ма$, то змінюючи коефіцієнт підсилення перетворювача можна домогтися дискретності зміни струму в $250ма/256 \approx 1ма$. Для визначення реально споживаного струму такої точності буде цілком достатньо. Для зчитування стану пристрою порівняння споживаного струму існує ще один розряд LPT-порту на введення (3-й біт порту 379Н).

Оскільки в різних ІМС живлення подається на різні виходи (наприклад, у Д0155ІА3 - 14 і 7 виходи, а в Д0155ІЕ2 - 5 і 10 виходи для подачі +5в і GND відповідно), передбачено всі варіанти подачі живлення на різні виходи колодки, призначеної для ІМС що перевіряється. Існують 6 варіантів включення "+" живлення й 3 варіанти включення GND (ІМС вставляється зі зсувом убік 16-го контакту колодки, "ключ" мікросхеми при цьому повинен бути спрямований убік 1-го контакту колодки).

Для реалізації програмного управління напругою живлення й струмом споживання ІМС у якості ЦАП обраний Д0572ПА1А, якій відповідає вимогам розрядності (≥ 8 біт) й швидкодії ($< 100мкс$). ІМС є помножуючий ЦАП, виконаний по КМОП технології, яка призначена для перетворення паралельного 10-розрядного двійкового коду на цифрових входах у струм на аналоговому виході, якій пропорційний значенням коду й (або) опорної напруги. ІМС поставля-

ється в герметичному 16-вивідному металокерамічному корпусі типу 201.16-8 із дворядним вертикальним розташуванням висновків. Умовне графічне позначення ЦАП Д0572ПА1А наведено на рис. 3.

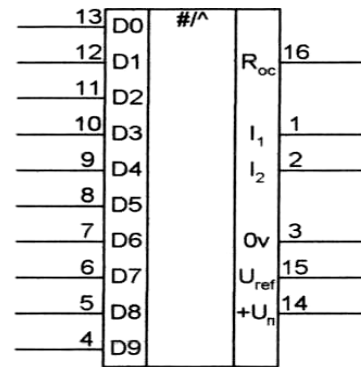


Рис. 3. ЦАП Д0572ПА1А

Для запам'ятовування виставлених значень в якості вхідних регістрів необхідно мати 8 - бітні паралельні регістри із сумарним числом, які запам'ятовують 32 біта. Ці регістри повинні мати вхід запису, що працює згідно такту, вхід дозволу паралельного завантаження, швидкодію $< 100мкс$. Вони не повинні мати Z-стан (щоб не було невизначених рівнів сигналів). Цим вимогам відповідають регістри Д0555ІР27. В якості регістрів комутації управління напругою й струмом існує 4 мікросхеми Д0555ІР27, оскільки вони забезпечує необхідну розрядність (8 біт), управління (запис / запам'ятовування / зберігання) і швидкодія. Мікросхема регістру Д0555ІР27 виконана в пластмасовому корпусі 1400.20-2 із дворядним вертикальним розташуванням виходів. Умовне графічне позначення мікросхеми Д0555ІР27 наведено на рис. 4.

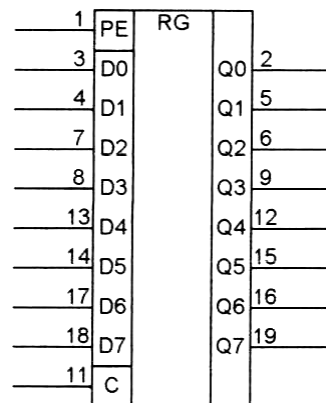


Рис. 4. Регістр Д0555ІР27

В якості управляючого пристрою використовується дешифратор з кількістю входів 3, кількістю виходів не менш 7 і швидкодією $< 100мкс$. Цим вимогам відповідає мікросхема Д0555ІД7. Це двоїчно - десятковий дешифратор - демультіплексор, якій перетворює трирозрядний код А0...А2 у напругу низького рівня, яка з'являється на одному з восьми виходів /0.../7. Цю же мікросхему можна обрати в

якості дешифратору у пристрої комутації живлення як у ланцюзі "+" живлення, так і в ланцюзі GND. Мікросхема виконана в пластмасовому корпусі 238.16-2 із дворядним вертикальним розташуванням виходів. Умовне графічне позначення мікросхеми дешифратору Д0555ИД7 наведено на рис. 5.

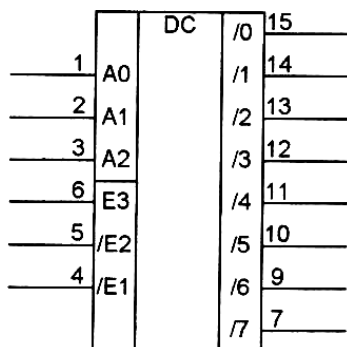


Рис. 4. Дешифратор Д0555ИД7

Для зчитування даних з виходів повіряємої мікросхеми (для перекладу 4-бітного коду в 8-бітний) існують двох входів 4-канальні мультиплексори без інверсії, із сумарним числом зчитувальних біт - 32 і швидкодією <100мкс. Цим вимогам відповідають 4 мікросхеми Д0555КП11. Мікросхема виконана в пластмасовому корпусі 238.16-2 із дворядним вертикальним розташуванням виводів. Умовне графічне позначення мікросхеми мультиплексору Д0555ИД7 наведено на рис. 6.

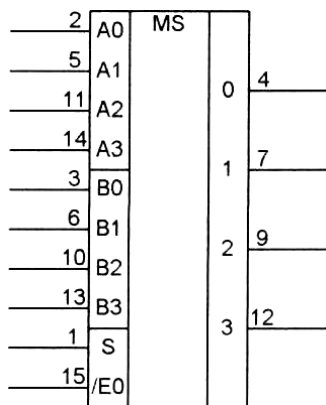


Рис. 6. Мультиплексор К555КП11

Висновки

1. В статті описано пристрій за допомогою якого здійснюється контроль та визначення параметрів ІМС на зразках озброєння та військової техніки в зоні проведення антитерористичної операції.

2. Пристрій призначено для тестування й визначення типу ІМС методом сигнатурного аналізу ІМС ТТЛ (серії ДО 155, Д0555, Д0531, ДО 1531) і КМОП (серії Д0176, Д0561, Д01561).

3. За допомогою пристрою визначається логіка, що дозволяє робити перевірку всіх статичних режимів роботи ІМС, які перевіряються обслугою метрологічних ремонтно-відновлювальної груп в зоні проведення антитерористичної операції.

Список літератури

1. Кононов В.Б., Копашинський С.А., Коваль О.В. Метрологічне забезпечення у сфері оборони в умовах проведення антитерористичної операції // Зб. наук. пр. ХНУПС 2017.-№ 4(53)-С.144-147.

2. Кононов В.Б. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення //Авиационно-космическая техника и технология.— Харків: НАУ ХАИ—2011.-№ 8 (85) -С.231 – 234.

3. Кононов В.Б. Види та методи оцінювання результатів вимірювання засобами вимірювальної техніки // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. ХУПС. – Вип.5 (95). – Харків, 2011. – С. 45–49.

4. Наказ Міністра оборони України від 15.12.2006 № 731 “Про затвердження нормативних документів з метрології та метрологічної діяльності.”

5. Наказ начальника Центрального управління метрології і стандартизації “Про затвердження Керівництва з організації виробничої діяльності військових метрологічних лабораторій в Міністерстві оборони України та Збройних Силах України” від 14.05.2007 № 2.

Надійшла до редколегії 19.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Більчук, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА ТЕСТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА ОБРАЗЦАХ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

О.А. Кононова, В.С. Рак, С.П. Браславец

В статье описывается общая и структурная схемы устройства совместимого с IBM компьютером, при помощи которой осуществляется тестирование ИМС на образцах вооружения и военной техники с учётом опыта проведения антитеррористической операции.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, вооружение и военная техника, интегральные микросхемы.

DESCRIPTION OF THE INTEGRATED MICROCIRCUIT TESTING DEVICE ON SAMPLES OF ARMAMENT AND MILITARY EQUIPMENT

O.A. Kononova, V.S. Cancer, S.P. Braslaviec

The article describes the general and structural diagram of an IBM-compatible computer that tests IMS on weapons and military equipment samples, taking into account the experience of conducting anti-terrorist operations.

Keywords: metrological support, armament and military equipment, integrated microcircuits.

УДК 621.396

Б.А. Лісогорський, І.А. Таран, Г.В. Худов

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНОЇ ТОЧНОСТІ ТРАЄКТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ В БАГАТОПОЗИЦІЙНІЙ СИСТЕМІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ КОНТРБАТАРЕЙНОЇ БОРОТЬБИ

В роботі для підвищення точності траєкторних вимірювань цілей в радіолокаційній станції контрбатареї боротьби запропоновано використання багатопозиційної системи радіолокаційних станцій. Проведена оцінка потенційної точності траєкторних вимірювань в багатопозиційній системі радіолокаційних станцій контрбатареї боротьби. Проведено порівняльний аналіз кореляційної матриці точності при однопозиційному прийомі та використанні багатопозиційної системи радіолокаційних станцій контрбатареї боротьби.

Ключові слова: радіолокаційна станція, контрбатареїна боротьба, кореляційна матриця помилок, траєкторні вимірювання, кочівний міномет, координати.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Досвід участі Збройних Сил (ЗС) України в антитеористичній операції свідчить про використання противником тактики кочівних мінометів [1]. При цьому вогневі позиції обладнуються поруч з житловими будинками [1]. Розвідка вогневих позицій кочівних мінометів може здійснюватися декількома способами [1-3]:

- повітряна та космічна розвідка;
- звукова розвідка;
- наземна радіолокаційна розвідка;
- оптична розвідка;
- фізична розвідка (засилання розвідників або використання агентури).

Але найбільш ефективним способом розвідки вогневих позицій кочівних мінометів є використання радіолокаційних станцій (РЛС) контрбатареїної боротьби (КББ) [4].

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Аналіз потенційної точності методів визначення координат об'єктів проводився в роботах [5-8] при визначенні координат повітряних цілей радіолокаційними засобами розвідки повітряного противника, в роботі [9] при визначенні координат космічних об'єктів та в роботах [10, 11] при визначенні координат джерел сейсмічних збурень. Основні підходи, запропоновані в роботах [5-11], можливо застосувати для оцінювання потенційної точності визначення позицій стріляючих вогневих засобів РЛС КББ. В той же час вирішення цієї задачі має певну специфіку, що потребує розробки відповідної методики. Проведені дослідження вказали на необхідність послідовного вирішення двох завдань: спочатку необхідно оцінити потенційну точність вимірювання координат снаряду (міни) на траєкторії польоту в залежності від точності первинних вимірювань та

просторової структури угруповання станцій прийому (далі – приймачів) РЛС КББ, після цього необхідно оцінити точність визначення координат позицій вогневих засобів з використанням результатів, отриманих при вирішенні першого завдання.

Мета статті – розробити методику оцінки потенційної точності траєкторних вимірювань в багатопозиційній системі РЛС КББ.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Точність вимірювання координат позиції вогневого засобу противника артилерійським розвідувальним комплексом (типу «Зоопарк», «Зоопарк-1», АН/ТРQ-48) буде залежати від точності вимірювань комплексом координат снаряда (міни) на траєкторії польоту (далі – від точності траєкторних вимірювань). Ця точність може бути підвищена шляхом застосування багатопозиційної локації. Запропонована методика визначення потенційної точності траєкторних вимірювань, з використанням якої проведені відповідні розрахунки при використанні як одного, так і декількох засобів комплексу.

Нехай снаряд чи міна в момент часу t_c знаходиться на траєкторії польоту в точці С з координатами (x_c, y_c, z_c) . (рис. 1). Радіолокаційний сигнал приймається приймачами комплексу, розташованими в точках A_i з координатами (x_i, y_i, z_i) , $i=1, \dots, N$, де N – загальна кількість приймачів комплексу (рис. 1). Розглянемо випадок, коли приймачі синхронізовані в часі, тобто вимірювання всіма приймачами здійснюються одночасно в момент часу t_c . В результаті спостережень на кожному з N приймачів вимірюється азимут α_i , кут місця β_i та похила дальність D_i до джерела сигналу (снаряду чи міни). Маємо вибірку незалежних вимірювань або вектор спостережень, який надаємо в вигляді (1):

$$U = (\alpha_1, \beta_1, D_1, \alpha_2, \beta_2, D_2, \dots, \alpha_N, \beta_N, D_N)^T, \quad (1)$$

де елементи вектора спостережень можна визначити як (рис. 1):

$$\alpha_i = \arctg \frac{y_c - y_i}{x_c - x_i}, \quad (2)$$

$$\beta_i = \arctg \frac{z_c - z_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}}, \quad (3)$$

$$D_i = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}. \quad (4)$$

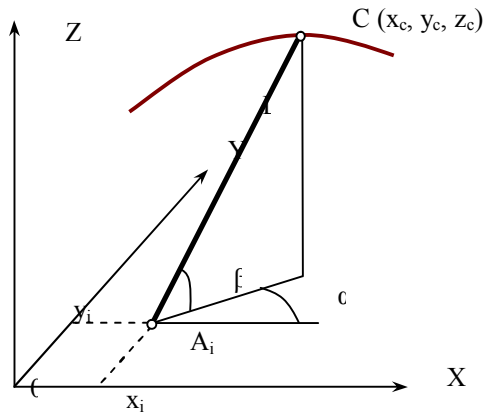


Рис. 1. Визначення елементів вектору спостережень

В результаті проведення траекторних вимірювань визначається вектор траекторних вимірювань $\xi = (x_c, y_c, z_c)$. При цьому помилки визначення елементів вектору ξ залежать від помилок траекторних вимірів:

$$\begin{cases} \Delta\alpha_i \approx \left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial\alpha_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial\alpha_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \\ \Delta\beta_i \approx \left(\frac{\partial\beta_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial\beta_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial\beta_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \\ \Delta D_i \approx \left(\frac{\partial D_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial D_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial D_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \end{cases}, \quad (5)$$

Вираз (5) перепишемо у матричному вигляді таким чином:

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\beta_1 \\ \Delta D_1 \\ \Delta\alpha_2 \\ \dots \\ \Delta D_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial\alpha_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\beta_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial D_1}{\partial x_c} & \frac{\partial D_1}{\partial y_c} & \frac{\partial D_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\alpha_2}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial z_c} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial D_N}{\partial x_c} & \frac{\partial D_N}{\partial y_c} & \frac{\partial D_N}{\partial z_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta x_c \\ \delta y_c \\ \delta z_c \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Введемо такі позначення:

$$F_\Delta = \begin{pmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\beta_1 \\ \Delta D_1 \\ \Delta\alpha_2 \\ \dots \\ \Delta D_N \end{pmatrix}, \quad \Delta_c = \begin{pmatrix} \delta x_c \\ \delta y_c \\ \delta z_c \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial\alpha_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\beta_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial D_1}{\partial x_c} & \frac{\partial D_1}{\partial y_c} & \frac{\partial D_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\alpha_2}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial z_c} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial D_N}{\partial x_c} & \frac{\partial D_N}{\partial y_c} & \frac{\partial D_N}{\partial z_c} \end{pmatrix}$$

Матриця B має розмірність $(m \times 3)$, де m - число незалежних вимірювань.

Після диференціювання рівнянь (2) – (4) по x_c , y_c і z_c , відповідно, отримуємо вирази:

$$\frac{\partial\alpha_i}{\partial x_c} = \frac{y_c - y_i}{\left(1 + \frac{(y_c - y_i)^2}{(x_c - x_i)^2}\right) \cdot (x_c - x_i)^2},$$

$$\frac{\partial\alpha_i}{\partial y_c} = \frac{1}{\left(1 + \frac{(y_c - y_i)^2}{(x_c - x_i)^2}\right) \cdot (x_c - x_i)},$$

$$\frac{\partial\alpha_i}{\partial z_c} = 0,$$

$$\frac{\partial\beta_i}{\partial x_c} = \frac{(x_c - x_i)(z_c - z_i)}{\left(1 + \frac{(z_c - z_i)^2}{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}\right)} \times$$

$$\frac{1}{((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2)^{3/2}},$$

$$\frac{\partial\beta_i}{\partial y_c} = \frac{(y_c - y_i)(z_c - z_i)}{\left(1 + \frac{(z_c - z_i)^2}{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}\right)} \times$$

$$\frac{1}{((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2)^{3/2}},$$

$$\frac{\partial\beta_i}{\partial z_c} = \frac{1}{1 + (z_c - z_i)^2 / \left((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 \right)} \times$$

$$\frac{1}{\left(\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2} \right)^{-1}},$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_c} = \frac{x_c - x_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial y_c} = \frac{y_c - y_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial z_c} = \frac{z_c - z_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}$$

Рівняння (6) с урахуванням (7) перепишемо в наступному вигляді (8):

$$F_{\Delta} = B \Delta_c \quad (8)$$

Після перемноження лівої і правої частини рівняння (8) на транспоновані цим частинам матриці і взяття середнього результату отримуємо:

$$\overline{F_{\Delta} F_{\Delta}^T} = \overline{B \Delta_c (B \Delta_c)^T},$$

$$\overline{F_{\Delta} F_{\Delta}^T} = \overline{B \Delta_c \Delta_c^T B^T}.$$

Позначимо через K_r – кореляційну матрицю ($m \times m$) помилок вимірювань азимутів, кутів місця та похильних дальностей:

$$K_r = \overline{F_{\Delta} F_{\Delta}^T}.$$

При незалежних вимірюваннях та використанні однакових приймачів ця матриця буде діагональною і мати наступний вигляд:

$$K_r = \begin{pmatrix} \sigma_{\alpha}^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_D^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_D^2 \end{pmatrix},$$

де σ_{α} , σ_{β} , σ_D – середньоквадратичні відхилення помилок вимірювання приймачами, відповідно, азимуту, куту місця, та нахильної дальності.

Позначимо через $K_c(3 \times 3)$ – кореляційну матрицю помилок визначення вектора траєкторних вимірювань ξ :

$$K_c = \overline{\Delta_c \Delta_c^T}.$$

Із врахуванням введених позначень отримуємо рівняння (9):

$$K_r = B K_c B^T \quad (9)$$

В рівнянні (9) матриця B являється прямокутною розмірності ($m \times 3$), що ускладнює безпосереднє знаходження матриці K_c . Для подолання вказаних

труднощів перемножимо обидві частини рівняння (9) з лівої сторони на B^T , а з правої на B . Отримаємо (10):

$$B^T K_r B = B^T B K_c B^T B \quad (10)$$

Зауважимо, що в правій частині рівняння (10) отримана квадратна матриця $(B^T B)$ розмірності (3×3).

Після перемноження обох частин рівняння (10) з лівої і правої сторони на матрицю $(B^T B)^{-1}$, обернену $(B^T B)$, отримуємо:

$$(B^T B)^{-1} B^T K_r B (B^T B)^{-1} = (B^T B)^{-1} B^T B K_c B^T B (B^T B)^{-1} \quad (11)$$

С урахування того, що

$$(B^T B)^{-1} (B^T B) = I,$$

де I – одинична матриця, знайдемо рівняння для розрахунку кореляційної матриці помилок визначення вектору траєкторних вимірювань (вираз (12)):

$$K_c = (B^T B)^{-1} B^T K_r B (B^T B)^{-1} \quad (12)$$

Розрахунки проведемо для двох варіантів побудови угруповання приймачів РЛС КББ. Перший варіант (рис. 2):

- кількість приймачів РЛС КББ $N=3$;
- координати точки траєкторії, для якої оцінювалась точність: $x_c=2$ км, $y_c=2$ км, $z_c=2$ км;
- координати приймачів: $x_1=2$ км, $x_2=1$ км, $x_3=3$ км; $y_1=1$ км, $y_2=1$ км, $y_3=1$ км;
- значення середньоквадратичних відхилень вимірювань: $\sigma_{\alpha}=0,3^\circ$, $\sigma_{\beta}=0,3^\circ$, $\sigma_D=10$ м.

Другий варіант відрізняється від першого наявністю тільки одного приймача, розташованого в точці A_1 (рис. 2).

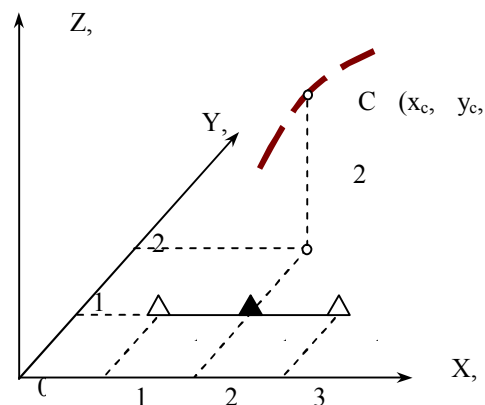


Рис. 2. Вихідні дані для розрахунків

В результаті розрахунків за виразом (12) отримані наступні кореляційні матриці помилок визначення вектору траєкторних вимірювань:

Для першого варіанту:

$$Kc = \begin{pmatrix} 699.994232 & 0.084743 & -0.048329 \\ 0.084743 & 256.147712 & -192.151649 \\ -0.048329 & -192.151649 & 192.914323 \end{pmatrix},$$

для другого варіанту:

$$Kc1 = \begin{pmatrix} 109.662277 & 0.099293 & -0.071216 \\ 0.099281 & 1875.963167 & -1423.975443 \\ -0.071199 & -1423.975443 & 1209.316960 \end{pmatrix}.$$

Таким чином, використання багатопозиційної системи РЛС КББ дозволяє підвищити потенційну точність траєкторних вимірювань угрупованням приймачів РЛС КББ. В наведеному прикладі продемонстровано підвищення точності траєкторних вимірювань при застосуванні багатопозиційної локації (застосуванні трьох приймачів замість одного).

Висновки і напрямки подальших досліджень

Таким чином, запропоновано для підвищення точності траєкторних вимірювань цілей в РЛС КББ використання багатопозиційної системи РЛС КББ. Проведена оцінка потенційної точності траєкторних вимірювань в багатопозиційній системі РЛС КББ.

У подальшому необхідно провести оптимізацію геометричної побудови багатопозиційної системи РЛС КББ на місцевості.

Список літератури

1. Худов Г.В. Радиолокаційні засоби розвідки позицій кочівних мінометів / Г.В.Худов, Б.А.Лисогорський, В.Я.Борульнич // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2014. – № 3 (39). – С. 68–72.
2. Мусиенко А. Опыт боевого применения минометов / А.Мусиенко. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://fastmarksman.ru/1_pyt/2_spechnaz_8.php.

3. Красюк О.П. Розвідувальне забезпечення артилерії в локальних війнах та збройних конфліктах кінця ХХ – початку ХХІ століття / О.П.Красюк // Військово-науковий вісник Академії Сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного. – 2012. – Вип. 18. – С. 339–347.

4. Худов Г.В. Аналіз характеристик радіолокаційних станцій контрбатареїної боротьби // Г.В. Худов, Б.А. Лисогорський / Системи озброєння і військова техніка, 2014. – Х.: ХУПС. – № 4 (40). – С. 50-54.

5. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

6. Черняк В.С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе ММО РЛС / В.С. Черняк // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – №8. – С. 29 – 46.

7. Дудуи А.С. Определение пространственных координат целей в многопозиционных радиолокационных системах на основе ММО РЛС / А.С.Дудуи // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 5 (112). – С. 29-33.

8. Седишев Ю.М. Об'єднання РЛС метрового діапазону хвиль в багатопозиційній радіолокаційній системі / Ю.М.Седишев, А.С.Дудуи // Наука і техніка Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – № 3 (12). – С. 83-88.

9. Березина С.И. Оценка ошибок определения местоположения сейсмического источника с использованием имитационного статистического моделирования / С.И.Березина, И.А.Таран // Восточный европейский журнал передовых технологий. – Вип. 4 (4)., 2003. – С. 13-15.

10. Таран И.А. Оценка потенциальной точности совместного определения координат источника сейсмических возмущений и скорости распространения сейсмической волны сейсмическими разведывательно-сигнализационными приборами / И.А.Таран // Збірник наукових праць ХВУ. – Вип.3(46), 2003. – С. 84-86.

11. Пастушенко Н.С. Совершенствование методов определения местоположения сейсмического источника / Н.С.Пастушенко, А.И.Солонец, И.А.Таран // Системи обробки інформації / Х.: ХВУ, 2004. – Вип..10 (37). – 248 с.

Надійшла до редколегії 24.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Васюта, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ КОНТРБАТАРЕЙНОЙ БОРЬБЫ

Б.А. Лисогорский, И.А.Таран, Г.В. Худов

В работе для повышения точности траекторных измерений целей в радиолокационной станции контрбатареїной борьбы предложено использование многопозиционной системы радиолокационных станций. Проведена оценка потенциальной точности траекторных измерений в многопозиционной системе радиолокационных станций контрбатареїной борьбы. Проведен сравнительный анализ корреляционной матрицы точности при однопозиционном приеме и использовании многопозиционной системы радиолокационных станций контрбатареїной борьбы.

Ключевые слова: радиолокационная станция, контрбатареїная борьба, корреляционная матрица ошибок, траекторные измерения, кочующий миномет, координаты.

EVALUATION OF POTENTIAL ACCURACY OF TRAJECTOR MEASUREMENTS IN MULTIPOSITION SYSTEM OF RADAR LOCATION STATIONS OF COUNTER-BATTERY STRUGGLE

B.A. Lisogorskiy, I.A. Taran, G.V. Khudov

In order to improve the accuracy of trajectory target measurements, a multi-position system of radar stations has been proposed in the radar station for counterbattery combat. The estimation of the potential accuracy of trajectory measurements in the multi-position system of radar stations of the counter-battalion fight was carried out. A comparative analysis of the correlation accuracy matrix is performed for a single-point reception and use of a multi-position system of radar stations for counterbattery combat.

Keywords: radars, counterbattery fight, correlation error matrix, trajectory measurements, wandering mortar, coordinates.

УДК 004.045:621.396.96

И.И. Обод, А.Э. Заволодько, Б.В. Монго

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПРОСНЫМИ СИСТЕМАМИ НАБЛЮДЕНИЯ

В статье, на основе анализа качества информационного обеспечения потребителей запросными системами наблюдения, рассмотрен метод повышения качества информационного обеспечения рассматриваемыми системами наблюдения заключающийся в выборе оптимального числа каналов обработки полетной информации в зависимости от возможного числа воздушных объектов, находящихся на одном азимуте. Показано, что оптимальный выбор числа каналов обработки информации приводит к повышению качества информационного обеспечения потребителей запросными системами наблюдения.

Ключевые слова: информационное обеспечение, запросные системы наблюдения, обработка полетной информации.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы. Эффективность принятия решения в системе контроля воздушного пространства определяется качеством информации, которая передается системами наблюдения воздушного пространства. К основным системам наблюдения воздушного пространства относятся первичные и вторичные (запросные) системы наблюдения [1 – 4]. Первые из этих систем позволяют дать ответ «где» находится воздушный объект, а вторая – «кто» он. Кроме того, одной из основных информационных задач запросных систем наблюдения является передача полетной информации с борта воздушного объекта на пункты управления.

Однако запросные системы наблюдения, как показывает практика их использования и показано в [4-9], имеют низкое качество информационного обеспечения потребителей, которое обусловлено принципом построения (несинхронная сеть) рассматриваемых систем, а также принципом обслуживания сигналов запроса. (одноканальная система массового обслуживания с отказами). Кроме того, передача полетной информации с борта воздушного объекта осуществляется информационной посылкой, которая имеет значительный временной интервал. Это снижает вероятность передачи полетной информации от нескольких воздушных объектов, находящихся на одном азимуте приводит к перекрытию части сигналов. Перекрытие сигналов приводит к внутрисистемным помехам и, следовательно, к потере полетной информации. Потеря информационной способности из-за перекрытия сигналов увеличивает вероятность конфликтных необнаруженных ситуаций в воздухе.

Цель работы. Повышение качества информационного обеспечения потребителей запросными системами наблюдения воздушного пространства.

Основная часть

Расширение возможностей использования воздушного пространства страны для полетов воздушных объектов возможно путем как повышения степени технической оснащенности современными средствами технической оснащенности воздушной и наземной связи, наблюдения и автоматизации управления воздушным движением, что соответствует требованиям глобальной эксплуатационной концепции организации воздушного пространства Международной организации гражданской авиации, так и широким использованием информационных технологий при получении, обработке, сохранении и передаче информации.

Запросные системы наблюдения воздушного пространства находят широкое распространение в системе контроля воздушного пространства. До основной функции запросных систем наблюдения принадлежит получение на пунктах управления полетной информации с борта воздушного объекта и идентификация обнаруженного воздушного объекта за признаком «свой-чужой». Однако построение запросных систем наблюдения на принципе несинхронной сети обусловил значительный уровень внутрисистемных помех, а также возможность заинтересованной стороне получать информацию с воздушного объекта путем постановки преднамеренных коррелированных помех. Построение самолетного ответчика на принципе одноканальной системы массового обслуживания с отказами позволяет заинтересованной стороне полностью парализовать самолетный ответчик преднамеренной помехой нужной интенсивности. Таким образом, существующие запросные системы наблюдения воздушного пространства имеют низкую помехоустойчивость и помехозащищенность и, как следствие, низкое качество информационного обслуживания. Кроме того, выбор сигналов запросных систем наблюдения

(інтервально-временні, інтервально-частотні і позиційні коди), обумовив потребу в виборі полоси пропускання приймачів значально вище оптимальної величини. Це також приводить до зниження як помехостійкості такого каналу передачі інформації, так і до помехозахищеності розглянутих систем спостереження в цілому.

Ці обставини обумовили потребу вимірювання координат повітряного об'єкта за допомогою, яке передбачає прийом і обробку пакету сигналів відповіді, що складно забезпечити в умовах складної помехової обстановки. Насправді, при порівнянні і об'єднанні інформації, що необхідно для автоматичного складання формулярів повітряного об'єкта, критерієм є якість зміни координатної інформації, через ймовірності дійств до яких належить:

- ймовірність втрати правильної польотної інформації;
- ймовірність спотворення польотної інформації;
- ймовірність об'єднання координатної і польотної інформації запитних систем спостереження;

Коротко розглянемо ці ймовірності.

При обробці польотної інформації за схемою за критерієм k/m є ймовірність втрати правильної польотної інформації в пристрої обробки складає

$$P_{\text{vtr}} = 1 - P_{\text{p.i}}^k,$$

де $P_{\text{p.i}}$ – ймовірність видачі польотної інформації з виходу запитної системи спостереження в перших m інформаційних відповідях.

При використанні в пристроях обробки схем підтвердження польотної інформації за критерієм k/m ймовірність спотворення польотної інформації складає:

$$P_{\text{ick.p.i}} = \sum_{i=k}^m C_m^i P_{\text{ick}}^i (1 - P_{\text{ick}})^{m-i},$$

де P_{ick} – ймовірність видачі запитною системою спостереження ложної польотної інформації.

Польотна інформація запитних систем спостереження може надходити з деяким запізненням відносно координатної інформації, так званої номер дискрету приходу польотної інформації

$$N'_d = N_d + T(KI) / \tau_d,$$

де N_d – номер дискрету приходу координатної інформації; $T(KI)$ – запізнення для запитної системи спостереження, який відповідає коду координатної інформації; τ_d – час дискрету дальності.

Практично ймовірність об'єднання координатної і польотної інформації складає:

$$P_{\text{okp}} = (1 - P_{\text{vtr.p.i}})(1 - P_{\text{ick.p.i}})P \left\{ \begin{matrix} +N'_o \\ -N'_o \end{matrix} \right\},$$

де $P \left\{ \begin{matrix} +N'_o \\ -N'_o \end{matrix} \right\}$ – умовна ймовірність приходу польотної інформації в стробі від $+N'_o$ до $-N'_o$ координатної інформації повітряного об'єкта.

Однак при цьому слід зауважити, що координати повітряного об'єкта з найкращими характеристиками визначаються на борту повітряного об'єкта з допомогою різноманітних систем навігації. Насправді ці координати можуть бути передані наземним пунктам управління по каналу відповіді запитних систем спостереження. Таким чином, запитні системи спостереження, які мають канал запитів і канал відповіді, більше стосуються до систем обміну інформацією між наземним пунктом управління і бортом повітряного об'єкта і можуть характеризуватися як запитні системи передачі інформації, з допомогою яких можна здійснити передачу координат з борту повітряного об'єкта. Це може змінити підхід до цих систем і, як наслідок, запропонувати нові методи підвищення їх інформаційних здібностей.

Розглянемо метод підвищення інформаційної здібності каналу передачі польотної інформації, який полягає в оптимальному виборі величини ймовірності передачі польотної інформації з повітряного об'єкта і числа каналів дешифрування приймаємої інформації. Під інформаційною здібністю будемо розуміти здібність розрізнити в просторі і в часі об'єкти. Оскільки перекриття сигналів має ймовірнісну природу і приводить до внутрисистемним помехам, описуваним ймовірнісними законами, можливість розрізнити будемо оцінювати статистично.

В якості кількісної міри, характеризуючої інформаційну здібність, виберемо ймовірність декодування i -го інформаційного повідомлення з групового потоку інформаційних повідомлень від N повітряного об'єкта за один період сканування антенної системи запитної системи спостереження – P_c . Ця ймовірність є функцією

Під інформаційною здібністю будемо розуміти здібність розрізнити в просторі і в часі об'єкти. Оскільки перекриття сигналів має ймовірнісну природу і приводить до внутрисистемним помехам, описуваним ймовірнісними законами, можливість розрізнити будемо оцінювати статистично.

В якості кількісної міри, характеризуючої інформаційну здібність, виберемо ймовірність декодування i -го інформаційного повідомлення з групового потоку інформаційних повідомлень від N повітряного об'єкта за один період сканування антенної системи запитної системи спостереження – P_c . Ця ймовірність є функцією

$$P_c = f(\tau_s, \Delta\beta, \Delta d, N, p, P)$$

де τ_s – тривалість передаваного повідомлення; $\Delta\beta, \Delta d$ – різниці азимутів і дальностей, при яких сигнали тривалістю τ_s перекриваються в часі; P – ймовірність передачі інформаційного сигналу з повітряного об'єкта.

Условие перекрытия сигналов от двух воздушных объектов в запросной системе наблюдения имеет вид

$$|T_i(t) - T_j(t)| < \tau_s,$$

где $T_i(t)$ – временной процесс i -го запросчика системы наблюдения.

Возможны следующие пути повышения информационной способности канала передачи полетной информации:

- стохастический выбор момента передачи в пределах ширины сканирующей диаграммы направленности запросной системы наблюдения за один период сканирования или за m периодов;
- увеличение числа каналов обслуживания на наземном объекте;
- использование адресного (индивидуального) опроса обслуживаемых воздушных объектов, обычно в комбинации с первым способом.

Рассмотрим далее вопросы комбинированного применения методов повышения информационной способности и возможности их практической реализации.

Пусть на близких азимутах находятся N воздушных объектов.

Обозначим через x_1, x_2, \dots, x_N случайные величины, принимающие значение 1 с вероятностью P и 0 - с вероятностью $(1 - P)$. Значению $x_i = 1$ соответствует передача полетной информации с i -го воздушного объекта.

Рассмотрим выбор оптимальной вероятности передачи сигнала P при многоканальном дешифраторе и i перекрытых информационных сигналах. Этому способствует возможность применения в запросных системах наблюдения способов передачи информационных сообщений многопозиционными сигналами. Они позволяют повысить помехоустойчивость передачи сообщений путем распознавания ошибок любой кратности.

Кроме того, современное состояние техники бортового оборудования позволяет создавать новые методы генерации потоков информационных сообщений.

Исходное уравнение для определения оптимальной вероятности передачи информационного сообщения с борта воздушного объекта имеет вид

$$P_c = \sum_{i=1}^N P_s^{(i)} \cdot P_d^{(i)} \cdot P_N^i \cdot P^i \cdot (1 - P)^{N-i}, \quad (1)$$

где P_d – вероятность декодирования информационного сообщения, если перекрыты оказались i сообщений; s – число каналов дешифратора;

$P_s^{(i)} = \begin{cases} 1, & \text{при } s > i, \\ 0, & \text{при } s < i \end{cases}$ – вероятность наличия незакрытого дешифратора.

Оптимальную вероятность передачи информационного сообщения с борта воздушного объекта можно определить из (1) путем дифференцирования $\frac{dP_s}{dP} = 0$. Вероятность декодирования информационного сообщения от конкретного воздушного объекта из группового потока информационных сообщений, передаваемого от m воздушных объектов за один период сканирования диаграммы направленности антенны, составляет

$$P_\alpha = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m i \cdot P_d^i \cdot C_m^i \cdot P^i \cdot (1 - P)^{m-i} + \frac{s}{m} \cdot \sum_{i=s+1}^m i \cdot P_d^i \cdot C_m^i \cdot P^i \cdot (1 - P)^{m-i}, \quad (2)$$

где i/m – вероятность поступления на обслуживание информационного сообщения от конкретного воздушного объекта в один из i дешифраторов, если взаимное влияние оказывают i информационных сообщений от m воздушных объектов; s/m – вероятность поступления на обслуживание информационного сообщения в один из s дешифраторов от конкретного воздушного объекта, если взаимное влияние оказывает $j > s$ информационных сообщений от m воздушных объектов ($s < m$).

Если декодирование информационного символа производится по первому принятому сигналу “Стоп”, то границу P_d^i путем простых логических рассуждений можно записать как

$$P_d^i < \left(1 - \frac{\delta}{(\alpha - 1) \cdot \tau_i} \right)^{(i-1)(\alpha-1)}, \quad (3)$$

где δ – разрешающая способность дешифратора; α – основание алфавита; i – число перекрытых информационных сообщений.

Расчеты по приведенным выражения представлены на рис. 1 и 2.

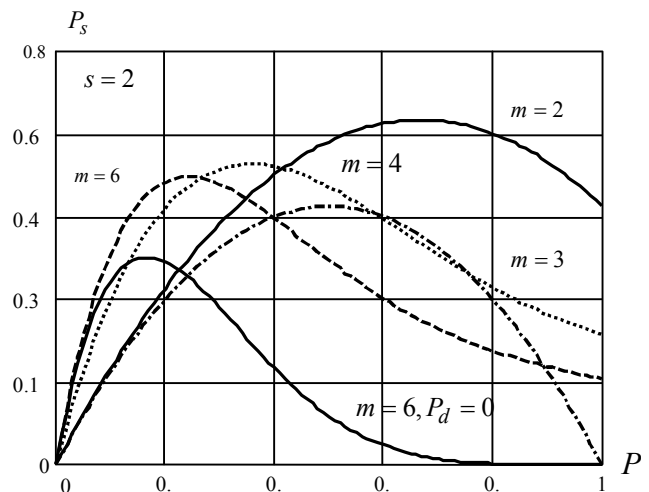


Рис. 1. Зависимость $P_s = f(P, s, m)$

Оптимальную вероятность передачи полетной информации с борта воздушного объекта можно определить из рис. 1. При этом, как следует из рис. 1, при $P_d \rightarrow 0$ для $I > 2$ оптимальная вероятность равна $P_0=1/m$. Если $P < P_0$ или $P > P_0$, то информация передается либо редко (канал недоиспользован), либо чрезмерно часто (канал перегружен). Оптимальная вероятность P_0 для $P_d = 0$ больше оптимальной вероятности для $P_d \rightarrow 0$ примерно в 1,4 раза. При этом и P_s также, для этого случая, больше в 1,4 раза.

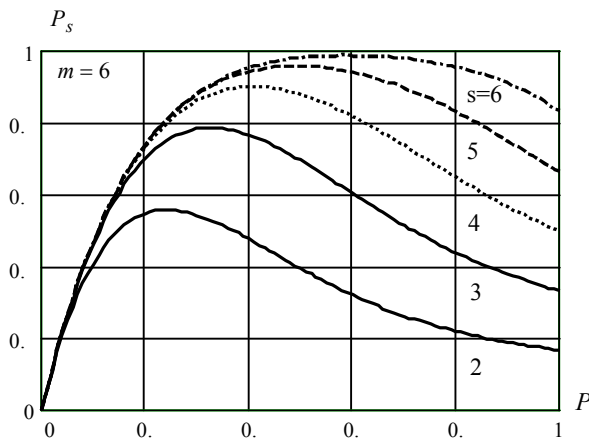


Рис. 2. Залежність $P_s = f(P, s, m)$

Таким образом полученные выражения и приведенные зависимости позволяют оценить требуемое число каналов обработки полетной информации в зависимости от возможного числа воздушных объектов, находящихся на одном азимуте.

Выводы

Получены выражения, позволяют определить оптимальное число каналов обработки полетной

информации в зависимости от возможного числа воздушных объектов, находящихся на одном азимуте, что позволит оптимизировать вероятность получения полетной информации на наземных пунктах управления.

Список литературы

1. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации / под ред. С.Г. Пятко и А.И. Краснова. - СПб.: Политехника, 2004. - 446 с.
2. Агаджанов П.А. Автоматизация самолетовождения и управления воздушным движением / П.А. Агаджанов, В.Г. Воробьев, А.А. Кузнецов. - М.: Транспорт, 1980. - 342 с.
3. Савицкий В.И. Автоматизированные системы управления воздушным движением / В.И. Савицкий. - М.: Транспорт, 1986. - 192 с.
4. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони / [Ткачев В.В., Даник Ю.Г., Жуков С.А. і др.] - К.: МОУ, 2004. - 342 с.
5. Stevens M.C. Secondary Surveillance Radar / M.C. Stevens. - Artech House, 1988. - 345 с.
6. Garcia M.L. Test For Success: Next Generation Aircraft Identification System RF Simulation / M.L. Garcia. - IEEE ICNS '07, 007.
7. Ray P.S. A novel pulse TOA analysis technique for radar identifications. / P.S. Ray - IEEE Trans. on Aerospace And Electronic systems, vol.34, No.3, pp.716-721, 1998.
8. Теоретичні основи побудови заводозахисних систем інформаційного моніторингу повітряного простору / [В.В.Ткачев, Ю.Г.Даник, С.А. Жуков, І.І.Обод, І.О. Романенко.] - К.: МОУ, 2004. - 271 с.
9. Обод І.І. Заводозахисність вторинних систем спостереження повітряного простору / І.І. Обод, І.В. Свид, І.А. Штих. - Х.: ХНУРЕ, 2014. - 310 с.

Надійшла до редколегії 23.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.А. Серков, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАПИТАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

І.І. Обод, Г.Е. Заволодько, Б.В. Монго

У статті, на основі аналізу якості інформаційного забезпечення споживачів запитальними системами спостереження, розглянуто метод підвищення якості інформаційного забезпечення розглядаємими системами спостереження який полягає у виборі оптимального числа каналів обробки польотної інформації в залежності від можливого числа повітряних об'єктів, що знаходяться на одному азимуті. Показано, що оптимальний вибір числа каналів обробки інформації призводить до підвищення якості інформаційного забезпечення споживачів запитальними системами спостереження.

Ключові слова: інформаційне забезпечення, запитальні системи спостереження, обробка польотної інформації.

IMPROVING THE QUALITY OF INFORMATION SUPPORT REQUEST SYSTEMS OF OBSERVATION

I.I. Obod, A.E. Zavalodko, B.V. Mongo

In the article, based on the analysis of the quality of information support for consumers by requesting surveillance systems, the method of improving the quality of information support by the survey systems under consideration is considered, which consists in choosing the optimal number of flight information processing channels, depending on the possible number of air units located on the same azimuth. It is shown that the optimal choice of the number of information processing channels leads to an improvement in the quality of information support for consumers by requesting surveillance systems.

Keywords: information support, requesting surveillance systems, flight information processing.

УДК 621.391

С.Г. Рассомахин, Е.И. Князев

Харьковский Национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ РЕКУРСИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Разработан математический метод синтеза цифровой модели частотно селективных цифровых устройств на основе фильтров рекурсивной структуры. Синтезирована математическая модель универсального фильтра нижних частот, получены аналитические описания частотных характеристик. Показана возможность формулировки и решения задач синтеза цифровых устройств с заданными характеристиками в линейном алгебраическом виде.

Ключевые слова: цифровой рекурсивный фильтр, частотные характеристики, метод наименьших квадратов, система линейных алгебраических уравнений.

Введение

Настоятельная необходимость перехода от аналоговой к цифровой реализации регуляторов в автоматических системах управления является, в настоящее время, объективной реальностью. Это обусловлено включением в контуры управления технологическими процессами и системами цифровых микропроцессорных интеллектуальных устройств. Цифровые устройства и цифровые технологии с успехом заменяют своих, морально устаревших аналоговых предшественников, что приносит в системы управления значительные улучшения характеристик и показателей точности управления за счет сокращения переходных процессов и уменьшения статических и динамических ошибок [1].

Постановка проблемы. На сегодняшний день существует достаточно много алгоритмов синтеза цифровых регуляторов и фазо-частотных избирательных схем [2-3], основанных на использовании свойств дискретных частотных преобразований [4], Z-преобразований и отображений Лапласа. Кроме того, разработан ряд формальных алгоритмов, основанных на аппроксимации нулей и полюсов дробно рациональных передаточных функций аналоговых прототипов [5]. При этом, для рекурсивных цифровых структур с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) известные алгоритмы приводят к чрезвычайно громоздким математическим формулировкам задач расчета коэффициентов ветвей прямой и обратной связи цифровых фильтров (ЦФ).

В данной статье разработан корректный, значительно более простой метод аппроксимации частотных характеристик аналоговых прототипов цифровых регуляторов, основанный на решении квадратичной задачи оптимизации, которая, в свою очередь, позволяет легко перейти к линейной алгебраической форме представления и решения.

Целью статьи является разработка математического метода синтеза цифровой модели частотно

селективных цифровых устройств на основе ЦФ рекурсивной структуры.

Основная часть

В типичную систему управления входят управляемый объект, регулятор, исполнительный механизм и датчики. Однако, набор этих элементов – еще не система. Для превращения в систему нужны каналы связи, через них идет обмен информацией между элементами. Для передачи информации могут использоваться компьютерные сети. Взаимосвязанные элементы – это уже система, которая обладает особыми свойствами, которых нет у отдельных элементов и любой их комбинации. Основная проблема управления связана с тем, что на управляемый объект и орган управления действуют внешние возмущения, которые препятствуют нормальному функционированию регулятора. Большинство возмущений заранее непредсказуемы, то есть носят случайный характер. Кроме того, неизбежным является присутствие шумов измерений параметров, используемых в цикле управления. Для достижений требуемых показателей качества управления в цифровых системах автоматического управления (САУ) используются частотно избирательные фильтры, которые вырабатывают выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения. ЦФ способны формировать сигналы рассогласования с минимальным уровнем искажений даже в условиях интенсивных помех.

Рекурсивные ЦФ, обладающие БИХ, являются более функциональными, чем нерекурсивные, поскольку нерекурсивные ЦФ, по сути, представляют собой частный (вырожденный) случай ЦФ БИХ при нулевых коэффициентах в цепях обратных связей. Поэтому разработка эффективного метода синтеза именно рекурсивных структур ЦФ представляется наиболее актуальной. Цифровой рекурсивный фильтр характеризуется структурой, показанной на рис. 1.

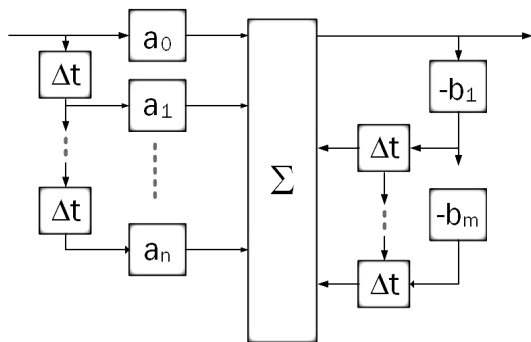


Рис. 1. Структура ЦФ с БИХ

Под синтезом ЦФ БИХ будем понимать нахождение значений векторов коэффициентов

$$\begin{aligned} A &= \{a_i\}, i \in 0, \dots, n; \\ B &= \{b_i\}, i \in 0, \dots, m; \end{aligned} \quad (1)$$

при которых частотные характеристики ЦФ удовлетворяют заданным требованиям. Строго говоря, в задачу проектирования входит и выбор подходящей структуры фильтра с учётом конечной точности вычислений.

Пусть передаточная функция аналогового прототипа регулятора, подлежащего реализации в цифровом виде, задана изображением по Лапласу $W(s) = W(j\omega)$, где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, ω – круговая частота. Необходимо найти векторы (1), обеспечивающие наилучшим образом аппроксимацию частотных свойств регулятора $W(j\omega)$ с помощью ЦФ, структура которого задана на рис.1, а передаточная функция имеет вид:

$$D(j\omega) = \frac{\sum_{i=0}^n a_i e^{-ji\omega}}{1 + \sum_{k=1}^m b_k e^{-kj\omega}} = \frac{A(j\omega)}{1+B(j\omega)}. \quad (2)$$

Математическая задача аппроксимации может быть записана в форме:

$$\min_{A,B} \left\{ C = \int_{\omega \in \Omega} |W(j\omega) - D(j\omega)|^2 d\omega \right\}, \quad (3)$$

где C – целевая функции задачи; Ω – частотный диапазон аппроксимации.

С учетом (2) задача преобразуется к виду

$$\min_{A,B} \left\{ C = \int_{\omega \in \Omega} \left| \frac{W(j\omega)(1+B(j\omega)) - A(j\omega)}{1+B(j\omega)} \right|^2 d\omega \right\}. \quad (4)$$

Поскольку интерес представляет нахождение значений векторов (1) для обеспечения требуемых частотных характеристик $W(\omega)$, то задача (4) может быть, без потери общности, преобразована к виду

$$\min_{A,B} \left\{ C = \int_{\omega \in \Omega} \frac{|W(j\omega)(1+B(j\omega)) - A(j\omega)|^2}{|1+B(j\omega)|^2} d\omega \right\}. \quad (5)$$

Поскольку числитель и знаменатель целевой функции (5) – строго неотрицательны на $\omega \in \Omega$, мож-

но перейти к эквивалентной задаче максимизации

$$\max_{A,B} \left\{ C^* = \int_{\omega \in \Omega} \left\{ |W(j\omega)(1+B(j\omega)) - A(j\omega)|^2 - |1+B(j\omega)|^2 \right\} d\omega \right\}. \quad (6)$$

Полученная целевая функция C^* представляет собой стандартную квадратичную форму метода наименьших квадратов. Это позволяет легко преобразовать задачу синтеза ЦФ БИХ к поиску экстремума унимодальной целевой функции на ограниченном интервале изменения параметров, что, в свою очередь, приводит к линейной алгебраической задаче.

Рассмотрим пример определения векторов (1) для получения рекурсивной реализации минимально-фазового фильтра нижних частот. В силу периодичности частотных характеристик ЦФ достаточно рассмотреть интервал $\omega \in [0, \pi]$. Пусть передаточная функция для данного примера $W(j\omega)$, имеет вид:

$$W(j\omega) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq \omega \leq \pi/2; \\ 0, & \text{при } \pi/2 \leq \omega \leq \pi. \end{cases} \quad (7)$$

Для наилучшей аппроксимации (7), при помощи (2) запишем исходную целевую функцию задачи в следующей форме:

$$C = \int_0^{\pi/2} \left| 1 - \frac{\sum_{i=0}^n a_i e^{-ji\omega}}{1 + \sum_{j=1}^m b_j e^{-ij\omega}} \right|^2 d\omega + \int_{\pi/2}^{\pi} \left| \frac{\sum_{i=0}^n a_i e^{-ji\omega}}{1 + \sum_{j=1}^m b_j e^{-ij\omega}} \right|^2 d\omega. \quad (8)$$

На основании выражений (3–6) перейдем к целевой функции эквивалентной задачи

$$\max_{A,B} \left\{ C^* = \int_0^{\pi/2} \left\{ |(1+B(j\omega)) - A(j\omega)|^2 - |1+B(j\omega)|^2 \right\} d\omega + \int_{\pi/2}^{\pi} \left\{ |A(j\omega)|^2 - |1+B(j\omega)|^2 \right\} d\omega \right\}. \quad (9)$$

Упрощение полученной задачи вычислением квадратов модулей комплексных функций дает следующее выражение:

$$\begin{aligned} \max_{A,B} C^* &= \int_0^{\pi/2} \left\{ 2 \sum_{i=0}^n a_i \cos(i\omega) + \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m a_i b_k \times \right. \\ &\times \cos[(i-k)\omega] - \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m a_i a_k \cos[(i-k)\omega] \left. \right\} d\omega + \\ &+ \int_{\pi/2}^{\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^m b_i \cos(i\omega) + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m b_i b_k \times \right. \\ &\times \cos[(i-k)\omega] - \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^n a_i a_k \cos[(i-k)\omega] \left. \right\} d\omega. \end{aligned} \quad (10)$$

Экстремум целевой функции(10) ищется в стационарной точке

$$\frac{dC^*}{da_i} = 0, i = 0, \dots, n; \quad \frac{dC^*}{db_k} = 0, k = 1 \dots m. \quad (11)$$

Поскольку операции интегрирования и дифференцирования являются линейными, то можно поменять порядок их выполнения. Дифференцирование подынтегрального выражения дает:

$$\frac{dC^*}{da_i} = \int_0^{\pi/2} \left\{ \cos(i\omega) + \sum_{k=1}^m b_k \cos[(i-k)\omega] - \sum_{k=0}^n a_k \cos[(i-k)\omega] \right\} d\omega - i = \overline{0, n}. \quad (12)$$

$$- \int_{\pi/2}^{\pi} \left\{ \sum_{k=0}^n a_k \cos[(i-k)\omega] \right\} d\omega = 0;$$

$$\frac{dC^*}{db_i} = \int_0^{\pi/2} \left\{ \sum_{k=0}^n a_k \cos(i-k)\omega \right\} d\omega + \int_{\pi/2}^{\pi} \left\{ \cos(i\omega) + \sum_{k=1}^m b_k [\cos(i-k)\omega] \right\} d\omega = 0. \quad (13)$$

Вычисление определенных интегралов в (12) и (13) дает формулы для записи уравнений линейной системы в следующем виде:

– первая часть СЛАУ – (n + 1) -уравнения

$$\sum_{k=0}^m \begin{cases} b_k \cdot \pi / 2, & i = k; \\ b_k \cdot \sin[(i-k)\pi / 2] / (i-k), & i \neq k; \end{cases} + \sum_{k=0}^n \begin{cases} -\pi a_k, & i = k; \\ 0, & i \neq k; \end{cases} = \begin{cases} \pi / 2 & i = 0; \\ \sin(i - \pi / 2) / i, & i \neq 0; \end{cases} \quad (14)$$

– вторая часть СЛАУ – m уравнений

$$\sum_{k=1}^m \begin{cases} b_k \cdot \pi / 2, & k = i; \\ b_k \cdot (-\sin[(i-k)\pi / 2]) / (i-k), & k \neq i; \end{cases} + \sum_{k=0}^n \begin{cases} a_k \cdot \pi / 2, & k = i; \\ a_k \cdot \sin(k-i) / (k-i), & k \neq i; \end{cases} = \frac{\sin(i\pi / 2)}{i}. \quad (15)$$

В выражении (14) переменная i обозначает номер уравнения (начиная с нулевого), а k – порядковый номер искомой координаты (коэффициента ЦФ БИХ) в векторах A и B. В выражении (15) номер уравнения определяется суммой (i+n). И используя левые части равенств (14) и (15), можно составить матрицу коэффициентов при неизвестных коэффициентах ЦФ. Использование правых частей (14), (15) дает матрицу-столбец свободных членов СЛАУ. Таким образом, для полного определения параметров ЦФ БИХ достаточно решить систему линейных алгебраических уравнений с матрицей коэффициентов при неизвестных, обладающей размером (n + m + 1) × (n + m + 1). Данная СЛАУ всегда является хорошо определенной и имеет единственное решение. Это является следствием унимодальности целевой функции (10) на интервале поиска решения. Структурная схема алгоритма моделирования разработанного метода представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема алгоритма моделирования расчета параметров ЦФ БИХ и оценки их характеристик

Моделирование производится в несколько этапов. Сначала, на основе выражений (14) и (15) формируется СЛАУ в матричном виде при произвольно заданном порядке ЦФ БИХ m и n. Пример результата формирования матричной СЛАУ для рассматриваемого минимально-фазового ФНЧ при n = m = 4 представлен на рис. 3. Решение СЛАУ методом Гаусса дает значения коэффициентов ЦФ, показанные на рис. 4.

$$A = \begin{pmatrix} -3.142 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -0.333 & 0 \\ 0 & -3.142 & 0 & 0 & 0 & 1.571 & 1 & 0 & -0.333 \\ 0 & 0 & -3.142 & 0 & 0 & 1 & 1.571 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3.142 & 0 & 0 & 1 & 1.571 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3.142 & -0.333 & 0 & 1 & 1.571 \\ 1 & 1.571 & 1 & 0 & -0.333 & 1.571 & -1 & 0 & 0.333 \\ 0 & 1 & 1.571 & 1 & 0 & -1 & 1.571 & -1 & 0 \\ -0.333 & 0 & 1 & 1.571 & 1 & 0 & -1 & 1.571 & -1 \\ 0 & -0.333 & 0 & 1 & 1.571 & 0.333 & 0 & -1 & 1.571 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} -1.571 \\ -1 \\ 0 \\ 0.333 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ -0.333 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Результат формирования СЛАУ ФНЧ

$$x := \text{Isolve}(A, B)$$

$$x = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.285 \\ -0.038 \\ -0.104 \\ 0.042 \\ 0 \\ -0.077 \\ 0 \\ 0.084 \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Решение СЛАУ ФНЧ

Первые 5 полученных значений определяют искомые коэффициенты ЦФ прямой ветви ЦФ, а последние 4 – коэффициенты рекурсии. Подстановка найденных значений в выражение передаточной функции ЦФ (2) позволяет вычислить модуль (АЧХ – амплитудно-частотную характеристику) и аргумент (ФЧХ – фазо-частотную характеристику). Частотные характеристики ЦФ БИХ, реализующего ФНЧ с минимальными фазовыми искажениями представлены на рис. 5 и 6.

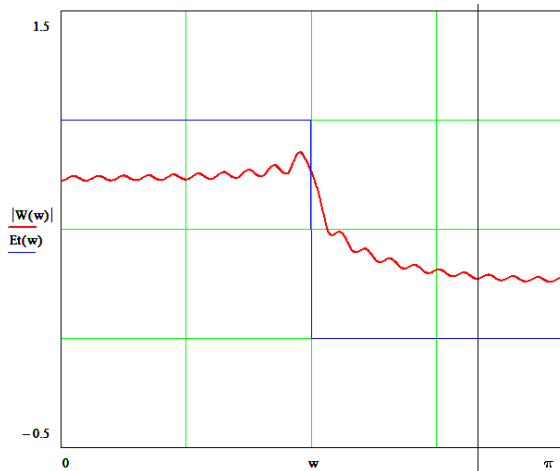


Рис. 5. АЧХ ЦФ БИХ ФНЧ.

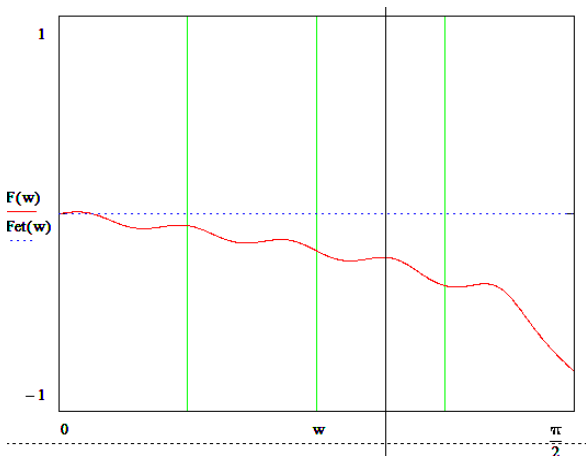


Рис. 6. ФЧХ ЦФ БИХ ФНЧ

На рис. 5 представлені 2 криві: $E_t(w)$ – АЧХ еталонної функції аналогового прототипа ФНЧ; $W(w)$ – АЧХ отриманої моделі рекурсивного ЦФ ФНЧ. Для отримання залежностей використано порядок ЦФ $n = m = 20$. На рис. 6 показані 2 залежності: $F(w)$ – еталонна ФЧХ аналогового прототипа ідеального фільтра нижніх частот; $F_{et}(w)$ – ФЧХ ЦФ БИХ. Залежності отримані при тих же значеннях порядку ЦФ. С збільшенням порядку ЦФ точність апроксимації характеристик аналогового прототипа, естественно, підвищується.

МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД СИНТЕЗУ ЦИФРОВИХ ЧАСТОТНО-ВИБОРЧИХ РЕКУРСИВНИХ ФІЛЬТРІВ

С.Г. Рассомахін, Є.І. Князев

Розроблено математичний метод синтезу цифрової моделі частотно селективних цифрових засобів на основі фільтрів рекурсивної структури. Синтезована математична модель універсального фільтра нижчих частот, отриманий аналітичний опис частотних характеристик. Показана можливість формулювання та вирішення задач синтезу цифрових засобів з заданими характеристиками в лінійному алгебраїчному вигляді.

Ключові слова: цифровий рекурсивний фільтр, частотні характеристики, метод найменших квадратів, система лінійних алгебраїчних рівнянь.

THE MATHEMATICAL METHOD OF SYNTHESIS OF DIGITAL FREQUENCY-SELECTIVE RECURSIVE FILTERS

S.G. Rassomakhin, E.I. Knyazev

A mathematical method for synthesizing a digital model of frequency-selective digital devices based on filters of the recursive structure is developed. A mathematical model of a universal low-pass filter has been synthesized, analytical descriptions of frequency characteristics are obtained. The possibility of formulating and solving problems of the synthesis of digital devices with given characteristics in a linear algebraic form has been shown.

Keywords: digital recursive filter, frequency characteristics, least squares method, system of linear algebraic equations.

Выводы

Разработанный метод синтеза рекурсивных ЦФ, основанный на нахождении точки экстремума унимодальной целевой функции, является более эффективным по сравнению с известными методами. Данная эффективность достигается за счет перехода от дробно-рациональной формы записи целевой функции к обычной квадратичной форме, позволяющей решать эквивалентную линейную задачу. При этом минимизация исходной сложной целевой функции заменяется максимизацией эквивалентной простой квадратичной формы. Для поиска стационарной точки целевой функции достаточно решить систему уравнений в частных производных, вырождающуюся в обыкновенную, хорошо определенную систему линейных алгебраических уравнений. Вычислительная сложность решения СЛАУ является полиномиальной и не превышает третьей степени, от размерности матрицы коэффициентов. Таким образом, предложенный метод синтеза рекурсивных ЦФ обеспечивает минимальную вычислительную сложность при максимальной точности аппроксимации частотных характеристик аналоговых прототипов.

Список литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: «Наука», 1975. – 374 с.
2. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход: Пер. с англ. – М. «Вильямс», 2004. – 992 с.
3. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд; пер. с англ. – М.: МИР, 1978. – 834 с.
4. Гостев В. И. Системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.: Техника, 1990. – 290 с.
5. Franklin. Gene F. Digital control of dynamic systems / Gene F. Franklin. J. David Powell. Michael L. Workman. Addison Wesley Longman. Inc. 1998. – 741 p.

Надійшла до редколегії 26.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаев, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

УДК 004.932

І.А. Хижняк

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків

ІНТЕГРУВАННЯ МУРАШИНОГО ТА РОЙОВОГО МЕТОДІВ СЕГМЕНТУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ, ЩО ОТРИМАНО З БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Проведено стислий аналіз сучасних еволюційного та ройового методів сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження. Для підсилення переваг та послаблення недоліків еволюційного (мурашиного) методу та ройового методів запропоновано удосконалений еволюційний метод сегментування оптико-електронного зображення, що заснований на інтегруванні мурашиного та ройового методів. Викладена сутність запропонованого удосконаленого методу сегментування.

Ключові слова: оптико-електронне зображення, сегментування, ройовий метод, мурашиний метод, еволюційний метод, бортова система, інтегрування.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Відомо [1–4], що в теперішній час не існує загальної теорії оптимального представлення та обробки зображень. Вибір конкретної технології обробки зображень залежить від задач, що вирішуються, та вимог, що висуваються до результату обробки. Існує велика кількість практичних задач, що потребують виявлення об'єктів інтересу на оптико-електронних зображеннях [5].

Складність обробки зображень обумовлена:

- по-перше, аномаліями (невеликими областями зображення), які можуть бути прийнятими за шум або дефект зображення;
- по-друге, невідомою формою та нечіткими границями об'єктів інтересу.

Викладене вище стосується і зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження, що вирішують завдання в інтересах безпеки і оборони [5, 6]. Результат обробки зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження, залежить від якості методу сегментування зображення. Тому перед розробниками систем обробки зображень постає вирішення актуального завдання розробки методик та методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Відомо [3, 6], що в теперішній час для сегментування зображень, використовуються генетичні методи. При використанні генетичних методів пошук рішення проходить на підмножині точок простору пошуку, що досягається створенням множини потенційних рішень, яке формує популяцію. Популяція удосконалюється за допомогою генетичних операторів, які відповідають за змінність та фітнес-функції, що моделюють природний відбір. Спадщина забезпечується

тим, що нові хромосоми формуються з хромосом попереднього покоління і, відповідно, мають загальні з ними гени. Якщо генетичний метод є коректним, то з кожним новим поколінням середнє значення фітнес-функції популяції та найкраще значення фітнес-функції зростають в сторону глобального оптимуму. В теперішній час генетичні методи активно використовуються для сегментування медичних зображень [3].

Для вирішення завдання сегментування медичних зображень також використовуються еволюційні методи [3]. В роботі [7] показано, що відомі еволюційні методи сегментування медичних зображень не можуть бути використані для сегментування оптико-електронних зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження.

По-перше, це пов'язано з різними умовами формування зображень та інформаційною складовою, що представлена на зображенні.

По-друге, це пов'язано з різними завданнями, що вирішуються при обробці зображень.

В роботі [7] поставлено завдання використання відомих еволюційних методів сегментування для сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. В [7] викладена сутність простішого еволюційного методу сегментування зображення, який відноситься до мурашиних методів. Процес сегментування зображення представлений як сукупність ділянок руху агентів (мурах). Визначено ймовірність переходу з однієї поворотної точки маршруту до іншої з урахуванням привабливості маршруту та концентрації феромонів на ньому. Завчасна сходимість рішень (вибір агентами одного й того ж маршруту) попереджається використанням зворотнього зв'язку – випаровуванням феромонів. Розраховуються параметри, що задають вагу феромона і привабливість ділянки. Визначаються найпривабливіші за вибраним критерієм маршрути, концентрація феромону на яких максимальна.

Феромон на непривабливих маршрутах поступово «висихає» і непривабливі маршрути зникають. При перевірці працездатності простішого еволюційного методу сегментування встановлено, що можливі реалізації методу з відверто невдалими результатами.

В [7] також викладена сутність удосконаленого еволюційного методу сегментування зображення, який є розвитком простішого еволюційного методу. В удосконаленому методі тільки найкращі агенти підвищують рівень феромону на своїх маршрутах. Рівень феромону на маршрутах є обмежений. Отримано вираз для оновлення рівня феромону. Кращим маршрутом може бути або кращий маршрут, знайдений в поточній ітерації (iteration best), або кращий маршрут, знайдений з початку роботи метода (best-so-far).

В роботі [8] викладена сутність простішого ройового методу сегментування оптико-електронного зображення, що отримано з бортової системи спостереження.

В роботах [7, 8] проведені експериментальні дослідження щодо сегментування еволюційним методом зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження. На сегментованому зображенні для прикладу визначені можливі об'єкти інтересу та встановлено, що виділені контури основних об'єктів інтересу співпадають з границями об'єктів на вихідному зображенні. Відмічається наявність на сегментованому зображенні великої кількості виділених контурів об'єктів малого розміру, наводиться приклад такої області. Оцінка ефективності застосування еволюційного методу проведена візуальним способом.

Для підсилення переваг та послаблення недоліків еволюційного (мурашиного) методу та ройового методів в роботі [9] запропоновано ройовий інтелект на основі інтеграції моделей адаптивної поведінки мурашиної та бджолоїної колоній. Але на пряму результати роботи [9] не можуть бути використані при сегментуванні оптико-електронного зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження.

Мета статті – удосконалити еволюційний метод сегментування оптико-електронного зображення, що заснований на інтегруванні мурашиного та ройового методів.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Основна мета при розробці ройового інтелекту полягає в інтеграції метаевристик, які закладені в бджолоїному та мурашиному методах сегментування [9]. При розробці удосконаленого еволюційного методу сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, будемо опиратися на результати, що отримані в роботі [9].

Суть інтегрування мурашиного та ройового методів сегментування полягає в комплексуванні процедур еволюційного (мурашиного) [7] та ройового [8] методів сегментування та обмін функціями основних агентів указаних методів (мурахи та бджоли). Такий спосіб інтегрування мурашиного та ройового методів сегментування приводить до створення гібридного агента, який послідовно виконує функції мурахи та бджоли. Удосконалений еволюційний метод сегментування оптико-електронного зображення, що заснований на інтегруванні мурашиного та ройового методів, наведений на рис. 1.

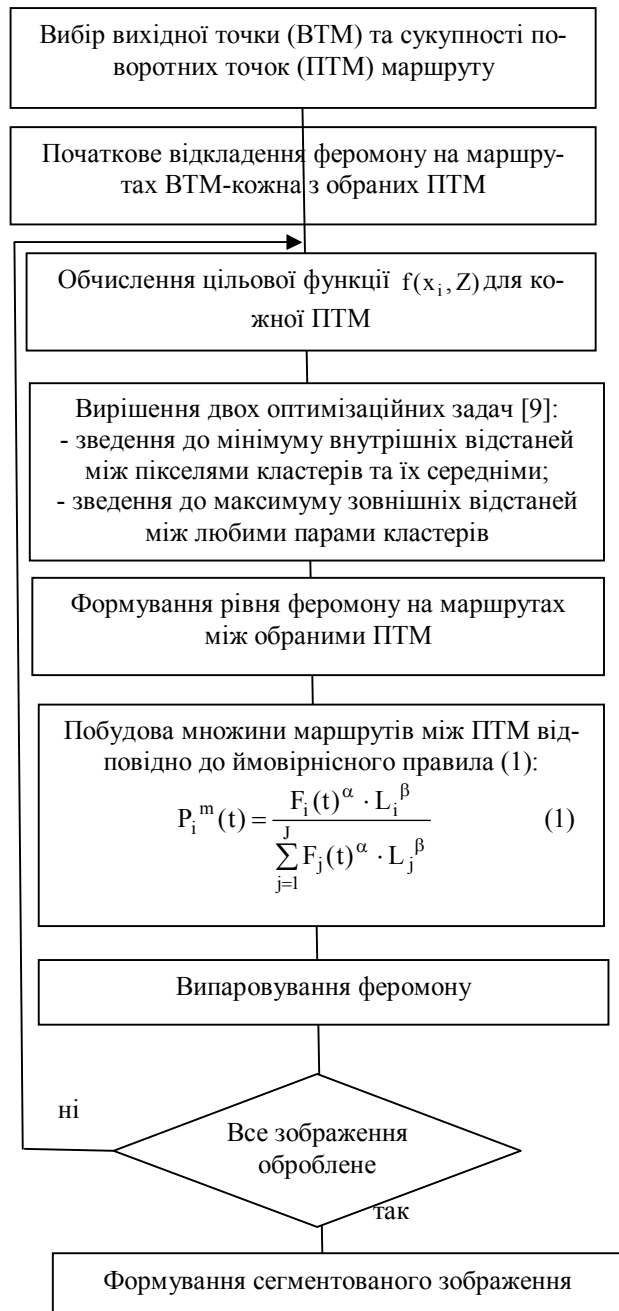


Рис. 1. Удосконалений еволюційний метод сегментування оптико-електронного зображення, що заснований на інтегруванні мурашиного та ройового методів

На початковому етапі на всіх маршрутах (рис. 2) від ВТМ до кожної з обраних ПТМ відкладається невелика однакова кількість феромону.

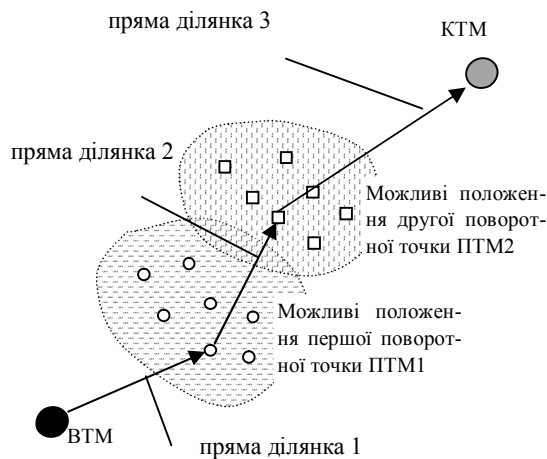


Рис. 2. ВТМ, КТМ, ПТМ та маршруту руху агента при сегментуванні зображення [7]

Так, наприклад, в роботі [8] початкова кількість феромону дорівнює 0,01. Удосконалений еволюційний метод сегментування оптико-електронного зображення, що заснований на інтегруванні мурашиного та ройового методів, використовує ітераційний процес. Кожна ітерація включає три етапи.

1. На першому етапі на кожному маршруті визначаються рішення і проводиться оцінка цього рішення (етап мурашиного методу). Самоорганізація системи при цьому забезпечується низькорівневою взаємодією мурах (агентів), при цьому агенти обмінюються тільки локальною інформацією, для передачі якої вони використовують спеціальний секрет, феромон, що відкладається агентом на своєму маршруті. Наступний агент, який буде знаходитись поблизу маршруту руху першого, сприймає феромон та з високою ймовірністю продовжить рух по шляху першого агента, в свою чергу відкладаючи феромон (підвищуючи його концентрацію на маршруті). Чим вище концентрація феромону на маршруті, тим вища привабливість цього маршруту для наступних агентів. Розподіл феромону в навколишньому середовищі являється немовби динамічною пам'яттю системи. Кожний агент в певний момент часу сприймає та змінює одну гратку цієї пам'яті – рівень феромону в околиці точки, в якій агент знаходиться.

Концентрація феромону, відкладеного на маршруті, пропорційна привабливості (якості, ефективності) маршруту. Чим привабливіший буде маршрут, тим більшою буде концентрація феромону на ньому, в результаті кращі маршрути зберігаються в глобальній пам'яті колонії агентів і з вищою ймовірністю будуть обрані наступними агентами.

2. На другому етапі кожної ітерації обчислюється цільова функція для кожної ПТМ та вирішуються

дві оптимізаційні задачі: зведення до мінімуму внутрішніх відстаней між пікселями кластерів та їх середніми та зведення до максимуму зовнішніх відстаней міжлюбими парами кластерів (етап ройового методу). В роботі [8] цільова функція при вирішенні задачі кластеризації мультиспектрального знімку визначається виразом (2):

$$f(x_i, Z) = w_1 \bar{d}_{\max}(Z, x_i) + w_2 (z_{\max} - d_{\min}(x_i)), \quad (2)$$

де z_{\max} – максимальне значення яркості пікселя на зображенні;

Z – матриця належності пікселів кластерам частинки i .

Кожен елемент z_{ijp} показує, чи належить піксель z_p кластеру c_{ij} частинки i .

Константи w_1 та w_2 є визначеними. Максимальна евклідова відстань від частинок до асоційованих з ними кластерів визначається за виразом (3):

$$\bar{d}_{\max}(Z, x_i) = \max_{j=1 \dots N_c} \left\{ \sum_{\forall z_p \in c_j} d(z_p, m_{ij}) / |c_{ij}| \right\}, \quad (3)$$

де $|c_{ij}|$ – потужність множини c_{ij} .

Мінімальна евклідова відстань між усіма парами кластерів визначається виразом (4):

$$d_{\min}(x_i) = \max_{\forall j_1, j_2, j_1 \neq j_2} \{d(m_{j_1}, m_{j_2})\}, \quad (4)$$

де m_{ij} відповідає вектору центру j -го кластеру i -ої частинки.

Цільова функція (2) забезпечує виконання двох оптимізаційних задач:

- зведення до мінімуму внутрішніх відстаней між пікселями кластерів та їх середніми $\bar{d}_{\max}(Z, x_i)$;

- зведення до максимуму зовнішніх відстаней міжлюбими парами кластерів, що забезпечується $d_{\min}(x_i)$.

3. На третьому етапі проводиться формування рівня феромону на маршрутах між обраними ПТМ відповідно до виразу (5):

$$F_i(t+1) = (1 - \rho)F_i(t) + \sum_{m=1}^M \Delta F_i^m, \quad (5)$$

де $\rho \in [0,1]$ – швидкість випаровування феромону;

ΔF_i^m – концентрація феромону на i -й ділянці маршруту, що створюється проходженням m -го агента;

проводиться побудова множини маршрутів між ПТМ відповідно до ймовірнісного правила (1) (етап мурашиного методу);

- заключною операцією третього етапу є випаровування феромону з визначеною швидкістю ρ (етап мурашиного методу).

Висновки і напрямки подальших досліджень

Таким чином, в роботі викладено удосконалений еволюційний метод сегментування оптико-електронного зображення, що заснований на інтегруванні мурашиного та ройового методів.

Удосконалений еволюційний метод сегментування оптико-електронного зображення, що заснований на інтегруванні мурашиного та ройового методів передбачає виконання функцій і мурашиного, і ройового методу.

Напрямами подальших досліджень є:

- формулювання критерію і оцінка ефективності удосконаленого еволюційного методу;
- проведення експериментального дослідження щодо сегментування оптико-електронного зображення удосконаленим еволюційним методом сегментування, що заснований на інтегруванні мурашиного та ройового методів;
- порівняння удосконаленого еволюційного методу сегментування з відомими методами сегментування оптико-електронних зображень.

Список літератури

1. Wang Y. S. A New Image Threshold Segmentation based on Fuzzy Entropy and Improved Intelligent Optimization Algorithm. *Journal of Multimedia*. 2014. Vol. 9, № 4. P. 499–505.
2. Zhu S. J., Zhao J. Y., Guo L. J. Rival Penalized Image Segmentation. *Journal of Multimedia*. 2014. Vol. 9, № 5. P. 736–745.
3. Faroogue M. Y., Raean M. S. Latest trends on image segmentation schemes. *International journal of advanced research in computer science and software engineering*. 2014. Vol. 4, № 10. P. 792–795.

4. Choudhary R., Gupta R. Recent trends and techniques in image enhancement using differential evolution – a survey. *International journal of advanced research in computer science and software engineering*. 2017. Vol. 7, № 4. P. 106–112.

5. Алімпієв А.М., Певцов Г.В. Особливості гібридної війни РФ проти України. Досвід, що отриманий Повітряними Силами Збройних Сил України. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. № 2 (27). 2017. С. 19–25.

6. Худов В.Г., Маковейчук О.М. Генетичні алгоритми для сегментування зображень систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 2 (23). С. 142–145.

7. Ruban I., Khudov H., Khudov V., Khizhnyak I., Makoveichuk O. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/9 (89). P. 49–57.

8. Хижняк І.А. Сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, ройовим методом. *Системи озброєння та військова техніка. Науковий журнал*. 2017. № 2 (50). С. 140–143.

9. Лебедев В.Б., Лебедев О.Б. Роевой интеллект на основе интеграции моделей адаптивного поведения муравьиной и пчелиной колоний. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. № 7. С. 41–47.

Надійшла до редколегії 19.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ИНТЕГРИРОВАНИЕ МУРАВЬИНОГО И РОЕВОГО МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО С БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

И.А. Хижняк

Проведено короткий анализ современных эволюционного и роевого методов сегментации изображения, полученного с бортовой системы оптико-электронного наблюдения. Для усиления достоинств и ослабления недостатков эволюционного (муравьиного) метода и роевого метода предложено усовершенствованный эволюционный метод сегментации оптико-электронного изображения, который основан на интегрировании муравьиного и роевого методов. Излагается сущность предлагаемого усовершенствованного метода сегментации.

Ключевые слова: оптико-электронное изображение, сегментация, роевой метод, муравьиный метод, эволюционный метод, бортовая система, интегрирование.

INTEGRATION OF THE ANT AND SWARM METHODS SEGMENTATION OF THE IMAGE RECEIVED FROM THE AIRBORNE OPTICAL-ELECTRONIC OBSERVATION SYSTEM

I.A. Khizhnyak

A short analysis of modern evolutionary and swarm methods of image segmentation, obtained from the on-board optical-electronic surveillance system, is carried out. To enhance the merits and mitigate the shortcomings of the evolutionary (ant) method and the swarm method, an improved evolutionary method for the segmentation of the optoelectronic image is proposed, which is based on integrating the ant and swarm methods. The essence of the proposed improved segmentation method is outlined.

Keywords: optical-electronic image, segmentation, swarm method, ant method, evolutionary method, airborne system, integration.

Питання управління в складних системах

УДК 621.3

В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко

Національний технічний університет «ХПИ», Харків

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ БОКСОВАНИЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Предлагается способ обнаружения и защиты от боксования тягового асинхронного привода дизель-поезда на основе нечёткой логики. Выполнена доработка математической модели тягового асинхронного привода, описана работа системы обнаружения и защиты от боксования и приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: боксование, тяговый асинхронный привод, дизель-поезд, нечёткая логика.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

Блок обнаружения и защиты от боксования является неотъемлемой частью системы управления любого локомотива, так как боксование ведёт к потере тяги и повышенному износу рельс и бандажей колес локомотива. Так как боксование является стохастическим процессом, то стохастический характер имеет и функция изменения коэффициента сцепления. До настоящего времени не удалось создать единую теорию сцепления, которая учитывала бы всё многообразие факторов, оказывающих влияние на силу сцепления колес с рельсами, и с приемлемой точностью позволяла бы прогнозировать изменение величины этого коэффициента. Особенно мало изучен характер его изменения при скоростях ниже 10 км/ч [1]. Существующие противобоксовочные системы включают в себя устройства обнаружения боксования и подавления его развития. Для этого используются различные методы и средства, которые повышают коэффициент сцепления: механическая и химическая очистка рельсов, подсыпка песка, кратковременное снижение силы тяги, приложение на короткое время тормозной силы [2, 3].

В тяговых расчётах используют расчётную характеристику сцепления, которая представляется как безразмерная величина K_{ψ} , зависящая от относительной скорости скольжения колеса относительно рельса $V_{ск}$ (рис. 1).

Эту характеристику получают путём обобщения результатов экспериментальных исследований [4, 5] и на ней можно выделить три области:

– в области устойчивой реализации силы тяги (1) K_{ψ} изменяется пропорционально относительно скорости скольжения $V_{ск}$;

– в области (2) наблюдается неустойчивая реализация силы тяги;

– в области (3) K_{ψ} начинает снижаться и наступает боксование [6 – 8].

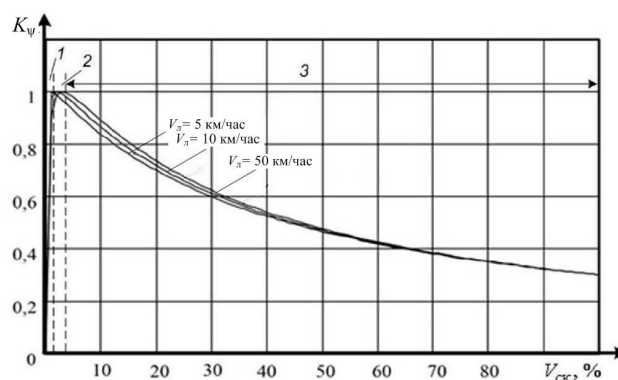


Рис. 1. Характеристика сцепления

Необходимо отметить, что процессы, протекающие в ТАД в каждой из областей, носят «размытый» характер. Поэтому в работе предлагается применить механизм нечёткой логики для реализации компьютерной подсистемы обнаружения боксования. В то же время, для получения характера изменения процессов, по которым будет производиться настройка подсистемы на нечеткой логике, необходимо иметь модель, которая бы адекватно отражала процессы в каждом из ТАД при возникновении боксования. В связи с этим, далее рассматривается разработка такой модели.

Целью статьи является разработка и исследование на математической модели способа обнаружения и защиты от боксования тягового асинхронного привода дизель-поезда.

Основная часть. Наиболее часто боксование выявляют по разности скоростей вращения колес-

ных пар; по ускорению колёсной пары; по разности токов тяговых двигателей; по скорости изменения тока тягового двигателя и др. Необходимо отметить, что процесс боксования требует дальнейшего изучения и в настоящее время нет такого метода, который бы не имел недостатков. Например, если сравнивать параметры боксующей и небоксующей колёсных пар, то если сцепление потеряют обе колёсные пары, защита от боксования может не сработать. Кроме этого, повышение чувствительности устройств обнаружения боксования приводит к ложным срабатываниям, а понижение чувствительности приводит к неспособности распознать начавшийся процесс боксования [9]. Эту задачу представляется возможным решить путём объединения нескольких подходов.

В качестве объекта регулирования рассматривается механическая часть тягового электропривода одного обмоточного вагона дизель-поезда ДЭЛ-02, включающая в себя два ТАД и два понижающих редуктора, представляемая как крутильная система, состоящая из двух колёсных пар (КП) и вращающихся масс привода, моменты инерции которых приведены к осям КП. Математическая модель, описывающая такую систему и включающая уравнение движения дизель-поезда, имеет вид ($i = \overline{1, 2}$):

$$\frac{dS}{dt} = V_L; \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_{pi}}{dt} = \omega_{pi}; \quad (2)$$

$$\frac{d\phi_{ki}}{dt} = \omega_{ki}; \quad (3)$$

$$J_{pi} \frac{d\omega_{pi}}{dt} = M_{Ti} - c_{dki}(\phi_{pi} - \mu_i \phi_{ki}) - \beta_{dki}(\omega_{pi} - \mu_i \omega_{ki}); \quad (4)$$

$$J_{ki} \frac{d\omega_{ki}}{dt} = c_{dki}(\phi_{pi} - \mu_i \phi_{ki}) + \beta_{dki}(\omega_{pi} - \mu_i \omega_{ki}) - M_{сцi} / \mu_i; \quad (5)$$

$$m \frac{dV_L}{dt} = \sum_{i=1}^2 M_{сцi} / (R_{ki} \mu_i) - F_c, \quad (6)$$

где S – путь, пройденный дизель-поездом; t – время; V_L – линейная скорость движения дизель-поезда; ϕ_{pi} , ϕ_{ki} – углы поворота ротора i -го ТАД и i -й КП относительно оси вращения; ω_{pi} , ω_{ki} – соответственно частота вращения ротора i -го ТАД и i -й КП; J_{pi} , J_{ki} – моменты инерции ротора i -го ТАД и i -й КП; M_{Ti} – тяговый момент i -го ТАД; c_{dki} – жёсткость связи КП с ТАД; μ_i – передаточное число i -го редуктора; β_{dki} – коэффициент демпфирования связи КП с ТАД; $M_{сцi}$ – момент сцепления i -й КП с

поверхностью рельса; m – масса дизель-поезда; R_{ki} – радиус колёс i -й КП; F_c – сила сопротивления движению, в общем случае зависящая от линейной скорости движения дизель-поезда [5].

Математическую модель каждого из ТАД в неподвижной системе координат $(\alpha, \beta, 0)$ можно записать следующим образом [10]:

$$\frac{di_{sa}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{sa} - \gamma i_{sa} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{ra} + p\beta\omega \Psi_{r\beta}, \quad (7)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\beta} - \gamma i_{s\beta} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\beta} - p\beta\omega \Psi_{ra}, \quad (8)$$

$$\frac{d\Psi_{ra}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sa} - \frac{\Psi_{ra}}{T_r} - p\omega \Psi_{r\beta}, \quad (9)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} + p\omega \Psi_{ra}, \quad (10)$$

$$M_T = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_r} (\Psi_{ra} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{sa}), \quad (11)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M_T - M_c), \quad (12)$$

где i_{sa} , $i_{s\beta}$ – соответственно проекции тока статора на оси α и β ; t – время; $\sigma = 1 - K_s K_r = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ – полный коэффициент рассеяния; $K_s = L_m / L_s$; $K_r = L_m / L_r$; L_s, L_r, L_m – соответственно индуктивность статора, ротора и взаимная индуктивность; $L_m = \sqrt{(1 - \sigma)L_s L_r}$; U_{sa} , $U_{s\beta}$ – соответственно проекции напряжения статора на оси α и β ; $\gamma = R_s / (\sigma L_s) + R_r L_m^2 / (\sigma L_s L_r^2)$; R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора; $\beta = L_m / (\sigma L_s L_r)$; $T_r = L_r / R_r$ – постоянная времени ротора; $\Psi_{ra}, \Psi_{r\beta}$ – соответственно проекции потокосцеплений ротора на оси α и β ; p – число пар полюсов; ω – частота вращения ротора; J – приведенный момент инерции двигателя; M – тяговый момент ТАД; M_c – момент сопротивления движению [10].

Момент сцепления i -й колёсной пары с поверхностью рельса задается выражением ($i = \overline{1, 2}$):

$$M_{сцi} = K_{\psi}(V_{ck}) R_{ki} \Psi_i P_i, \quad (13)$$

где $K_{\psi}(V_{ck})$ – характеристика сцепления i -й КП ($i = \overline{1, 2}$); Ψ_i – коэффициент сцепления; P_i – нагрузка КП на путь i -й КП.

Характеристику сцепления i -й КП можно аппроксимировать кусочно-линейной функцией:

$$K_{\psi_i}(V_{ck}) = \begin{cases} 0,33V_{ck}, & \text{если } 0 \leq V_{ck} < 3\%; \\ 1 - 0,0125(V_{ck} - 3), & \text{если } 3\% \leq V_{ck} < 43\%; \\ 0,5 - 0,0087(V_{ck} - 43), & \text{если } V_{ck} \geq 43\%. \end{cases} \quad (14)$$

Коэффициент сцепления i -й КП зависит от скорости движения дизель-поезда V_d . Данную зависимость для дизель-поезда можно представить в следующем виде:

$$\Psi_i = a_0 + \frac{a_1}{a_2 V_d + a_3}, \quad (i = \overline{1, 2}), \quad (15)$$

где a_0, \dots, a_3 – постоянные коэффициенты.

Так как при реализации тяги выделяются три области (рис. 1), то целесообразно получить изменение электромеханических процессов в каждой из них. Тогда по характеру изменения процессов можно определить область, в которой функционирует объект.

Для проектирования нечеткого контроллера, выполняющего задачу обнаружения боксования, необходимо выбрать процессы, которые наиболее информативно свидетельствуют о данном режиме. Исходя из анализа литературы, а также исследований, проведенных на разработанной модели, к таким процессам можно отнести следующие: разность скоростей вращения колесных пар; изменение тока каждого из ТАД; ускорение колесной пары.

Общая структура нечеткого контроллера приведена на рис. 2: X_1, X_2, X_3 – входные переменные; НК – нечеткий контроллер; ПНЗ – блок перехода к нечетким значениям; БП – база правил для нечеткого контроллера; БПП – блок применения правил; БД – база данных; ПЧЗ – блок перехода к четким значениям; Y – выходная переменная.

В качестве нечетких переменных рассматриваются следующие входные переменные: сигнал модуля разности скоростей вращения колесных пар (X_1); сигнал изменения тока ТАД (X_2); сигнал ускорения колесной пары (X_3). Каждая из этих переменных имеет следующие значения: NO – нормальное значение сигнала (без боксования); PRED – небольшое

отклонение от нормы (предбоксование); BOKS – большое отклонение от нормы (боксование).

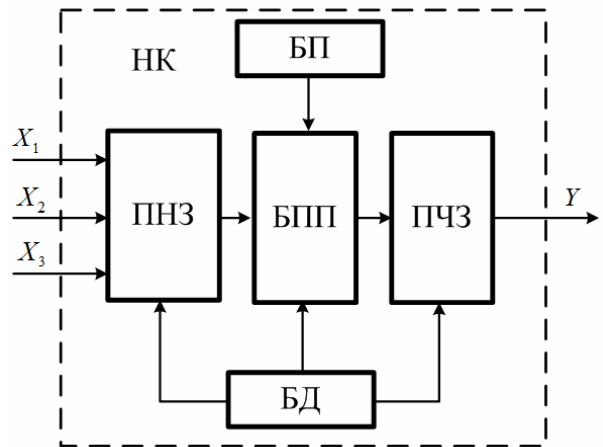


Рис. 2. Общая структура нечёткого контроллера

Правила, по которым работает нечеткий контроллер, строятся по типу:

1. если $X_1 = NO_1$ и $X_2 = NO_2$ и $X_3 = NO_3$ то $Y = NO$,
2. если $X_1 = NO_1$ и $X_2 = PRED_2$ и $X_3 = NO_3$ то $Y = NO$,
3. если $X_1 = PRED_1$ и $X_2 = PRED_2$ и $X_3 = NO_3$ то $Y = PRED$,
4. если $X_1 = PRED_1$ и $X_2 = BOKS_2$ и $X_3 = BOKS_3$ то $Y = BOKS$,
5. если $X_1 = BOKS_1$ и $X_2 = BOKS_2$ и $X_3 = PRED_3$ то $Y = BOKS$ и т.д.

Такой нечеткий контроллер ставится для каждого ТАД, что позволяет выявлять синхронное боксование. После обнаружения боксования, разработанная система выполняет его устранение.

Структурная схема системы обнаружения и защиты от боксования приведена на рис. 3.

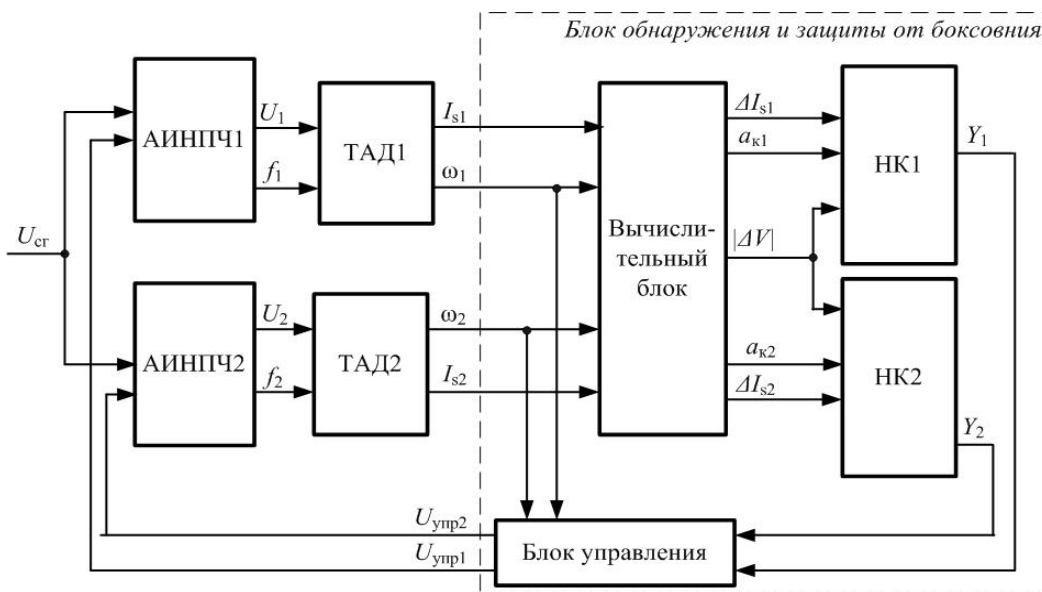


Рис. 3. Структурная схема системы обнаружения и защиты от боксования

На структурній схемі рис. 3 приведені наступні позначення ($i=1, 2$): U_{cr} – напруга синхронного генератора; АИНПЧ1 і АИНПЧ2 – автономні інвертори напруги – перетворювачі частоти; ТАД1 і ТАД2 – тягові асинхронні двигатели; НК1 і НК2 – нечіткі контролери; U_i , f_i – амплітуда і частота живлячого напруги; ω_i , I_{si} – частота обертання ротора і струм статора; ΔI_{si} – зміна струму статора i -го ТАД; a_{ki} – прискорення колісної пари; $|\Delta V|$ – модуль різниці швидкостей обертання колісних пар; Y_i – вихідний сигнал нечіткого контролера; $U_{упр}$ – керуючий вплив.

Сигнали з виходів нечітких контролерів поступають на блок управління, який виробляє сигнали управління для АИНПЧ1 і АИНПЧ2. При наявності блокування система формує керуючі впливи, які обмежують амплітуду живлячого напруги ТАД блокуваної колісної пари.

Для перевірки розробленої моделі в момент часу $t_1 = 8$ сек (рис. 4) смодельовано ситуацію втрати сцеплення першої колісної парою, а в момент часу $t_2 = 8,1$ сек – другою колісною парою. Це виконано шляхом зменшення величини коефіцієнта сцеплення відповідної колісної пари.

Коли нечіткий контролер розпізнає процес блокування, амплітуда сигналу на його виході становить більше 0,5.

На рис. 4 показані сигнали на виході нечітких контролерів НК1 і НК2 при відсутності захисту від блокування (Y_1, Y_2).

На рис. 5 показані сигнали на виході нечітких контролерів НК1 і НК2 при наявності захисту від блокування (Y_1^*, Y_2^*).

Відмінно від наведених на рис. 4 сигналів, завдяки спрацюванню захисту від блокування, сигнали на виході нечітких контролерів в момент часу $t = 11,5$ сек. стають менше 0,2, що сигналізує про припинення блокування.

На рис. 6 наведені графіки зміни швидкостей колісних пар при наявності (V_{k1}^*, V_{k2}^*) і при відсутності захисту від блокування (V_{k1}, V_{k2}).

З наведених залежностей (рис. 6) видно, що при відсутності захисту від блокування швидкості колісних пар V_{k1} і V_{k2} поступово зростають, що свідчить про наявність блокування.

В разі наявності захисту від блокування, швидкості колісних пар V_{k1}^* і V_{k2}^* в момент часу $t = 11$ сек. повернулися до норми, що свідчить про припинення блокування.

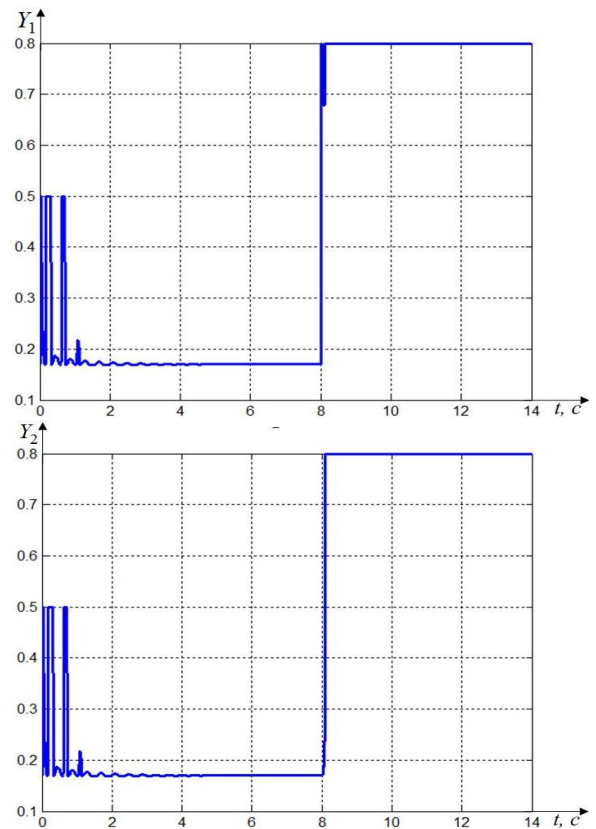


Рис. 4. Сигнали Y_1 і Y_2 на виході нечітких контролерів при синхронному блокуванні (при відсутності захисту від блокування)

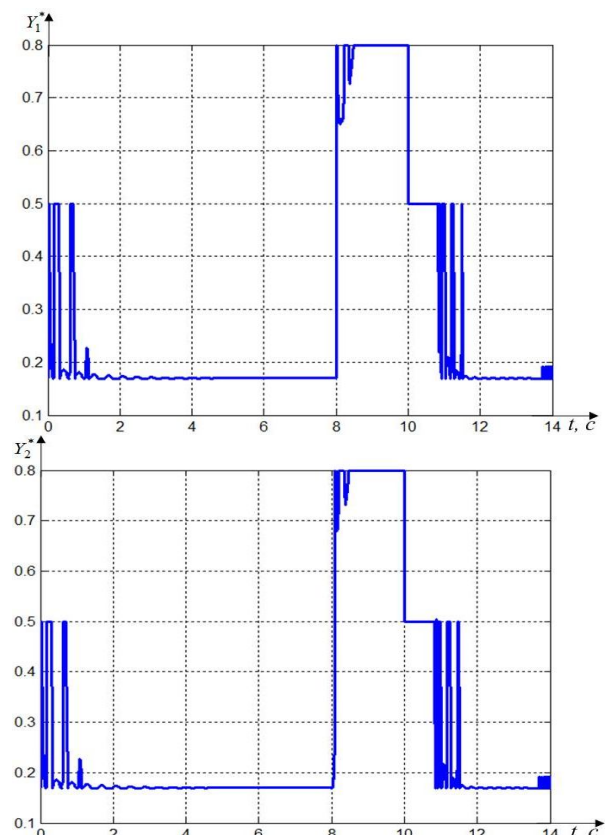


Рис. 5. Сигнали Y_1^* і Y_2^* на виході нечітких контролерів НК1 і НК2 при синхронному блокуванні (при наявності захисту від блокування)

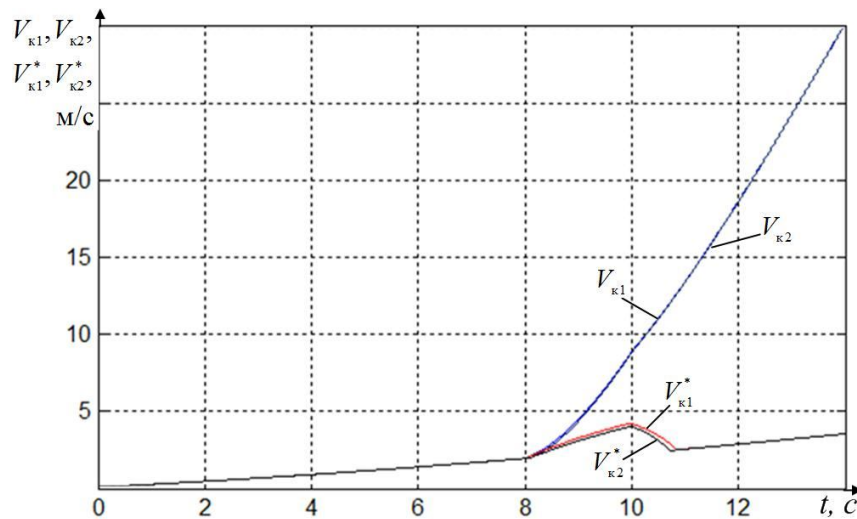


Рис. 6. Графіки зміни швидкостей колісних пар при синхронному боксуванні

Висновки

Для дослідження тягових асинхронних приводів розроблена математична модель, що дозволяє дослідити як синхронне, так і несинхронне боксування. Предложено спосіб виявлення та захисту від боксування, який має універсальність і дозволяє виконувати ефективну захисту від боксування. Це підтверджується результатами досліджень на математичній моделі.

Список літератури

1. Самме Г.В. Новые результаты в теории сцепления локомотива / Г.В. Самме // Транспорт российской федерации. Подвижной состав. – 2010. – № 3 (28). – С. 14 – 16.
2. Андриенко П.Д. Исследование переходных режимов при последовательном соединении серийных электродвигателей постоянного тока / П.Д. Андриенко, С.И. Шило, А.О. Каплиенко, И.Ю. Немудрый // Электротехника та електроенергетика. Науковий журнал. – Запоріжжя: 2009. – №1. – С. 10 – 16.
3. Фролов А.В. Повышение тяговых свойств тепловозов / А.В. Фролов // Известия ПГУПС. Исторические аспекты науки и техники. – 2011. – № 1. – С. 391 – 402.
4. Pichlik P. Overview of Slip Control Methods Used in Locomotives / P. Pichlik, J. Zdenek // Transactions on Electrical Engineering. – 2014. – № 2. – Vol. 3. – P. 38 – 43.
5. Усов В.А. Тяговая устойчивость при взаимодействии колёсной пары локомотива с рельсами. / В.А. Усов

// Транспорт урала. УрГУПС. – 2015. – №1 (44). – С. 97– 101.

6. Процив В.В. Алгоритм работы системы регулирования тягового усилия шахтного локомотива / В.В. Процив, А.М. Твердохлеб // Вісник КНУ. – Кривий Ріг: 2012. – № 32. – С. 234 – 239.

7. Артеменко А.Н. Система автоматического выравнивания нагрузки тягового электропривода карьерного электровоза / А.Н. Артеменко // Електромеханічні системи та автоматизація. Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – 2010. – Вип. 4 (63). – С. 56 – 58.

8. Зиборов К.А. Принципы построения системы согласования тягового усилия приводных колесных пар шахтного локомотива / К.А. Зиборов, А.М. Твердохлеб, С.А. Воскобойник // Гірнична електромеханіка та автоматика. Вісник КНУ. – 2012. – № 88. – С. 115-120.

9. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия. – 1974. – 328 с.

10. Попов А.Н. Антибоксовочная система управления движением рельсового подвижного состава / А.Н. Попов, И.А. Радионов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – №8. – С. 201 – 211.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ ВІД БОКСУВАННЯ ДИЗЕЛЬ-ПОТЯГУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

В.Д. Дмитрієнко, В.І. Носков, М.В. Мезенцев, Г.В. Гейко

Пропонується спосіб перевірки і захисту від боксування тягового асинхронного приводу дизель-потяга на основі нечіткої логіки. Виконано доопрацювання математичної моделі тягового асинхронного приводу, опису роботи системи контролю та захисту від боксування і наводяться результати моделювання.

Ключові слова: боксування, тяговий асинхронний привід, дизель-потяг, нечітка логіка.

METHOD OF DETECTION AND PROTECTION FROM DIESEL-TRAIN BOXING BASED ON FUZZY LOGIC

V.D. Dmitrienko, V.I. Noskov, N.V. Mezentsev, G.V. Geiko

A method is proposed for detecting and protecting from traction of a traction asynchronous drive of a diesel train on the basis of fuzzy logic. The mathematical model of the traction asynchronous drive has been modified, the operation of the detection and protection against boxing system is described and the results of the simulation are given.

Keywords: boxing, traction asynchronous drive, diesel train, fuzzy logic.

УДК 621.01.001, 681.527.2

С.М. Жигилій, О.Є. Зима, М.С. Педько

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ДЕБАЛАНСАМИ МЕХАНІЧНОГО ВІДЦЕНТРОВОГО ЗБУДЖУВАЧА КОЛИВАНЬ

Розглянуто особливості динамічної дії на оброблюване середовище нестационарного режиму роботи керованого механічного відцентрового дебалансного збуджувача коливань, оскільки тільки такий віброзбуджувач здатний створювати зазначений нестационарний режим. Доведено більшу насиченість та ефективність механічної дії, що генерується цим віброзбуджувачем при застосуванні нестационарного режиму його роботи. Наведено електричну й кінематичну схеми розробленої системи автоматичного керування рухомими дебалансами. Розглянуто та пояснено роботу вказаної системи. Указано на параметри, які визначають загальну динамічну дію нестационарних режимів на оброблюване середовище.

Ключові слова: керований механічний відцентровий дебалансний збуджувач коливань, рухомий дебаланс, динамічна дія, нестационарний режим вібраційної дії, система автоматичного керування рухомими дебалансами.

Вступ

Виконані протягом останнього часу дослідження динамічної дії на оброблюване середовище керованих механічних відцентрових дебалансних збуджувачів коливань (КМВДЗК), які є приводами вібраційних машин різноманітного технологічного призначення, довели їх високу ефективність. Застосування КМВДЗК дозволяє комплексно позбутися недоліків традиційних некерованих зарезонансних віброзбуджувачів [1], приводить до зменшення енерговитрат і собівартості одиниці виробничого вібротехнологічного процесу й забезпечує великий ресурс міцності та надійності [2]. Визначальним конструктивним елементом КМВДЗК є рухомий дебаланс (або декілька рухомих дебалансів), зовнішнє керування яким (якими) дає можливість створювати вібраційне поле необхідної структури й при потребі в автоматичному режимі у тих чи інших межах змінювати параметри цього поля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У разі застосування механічного дебалансного збуджувача коливань рух робочого органа вібротехнологічної машини визначається сумарною динамічною дією сил інерції елементів, які розміщені на дебалансному валу, що обертається. З інженерної ж механіки відомо, що сила інерції \vec{F}_i матеріальної точки M_i є векторною величиною

$$\vec{F}_i = -m_i \cdot \vec{a}_i,$$

де m_i та \vec{a}_i – маса та вектор прискорення цієї точки.

Першою головною особливістю КМВДЗК, який приводиться в обертальний рух зовнішнім електродвигуном, є те, що його пуск (як і зупинення) відбувається в динамічно зрівноваженому стані, коли зазначена вище сумарна динамічна дія еквівалентна нулевій (тобто повністю відсутня). Звісно, що

в такому стані КМВДЗК ніяких коливань не генерує. Тому під час його пуску після подачі живлення на приводний електродвигун, вал якого з'єднаний зі шківом віброзбуджувача пасовою передачею, кутова швидкість ω обертання дебалансного вала зростає від нуля до необхідного за технологічним процесом значення $\omega_{роб}$ без будь-яких проблем, які притаманні традиційним дебалансним віброзбуджувачам та пов'язані з «переходом» через проміжні резонанси (аналогічна, але протилежна до описаної ситуація виникає і при зупиненні КМВДЗК). Після «виходу» дебалансного вала на робочу кутову швидкість $\omega_{роб}$ механізмом керування рухомими дебалансами КМВДЗК переводиться у невірноважений стан, що призводить до адекватної зміни коливального руху (вібрації) робочого органа вібромашини.

Другою головною особливістю КМВДЗК є можливість застосування нестационарного режиму роботи, коли вібродинамічною дією на оброблюване середовище можна керувати «на ходу».

Якщо для забезпечення пуску і зупинення КМВДЗК у динамічно зрівноваженому стані достатньо обертати ходовий гвинт механізму керування рухомими дебалансами відповідним маховиком вручну, то для реалізації нестационарного режиму роботи необхідна самостійно працююча за необхідною програмою система автоматичного керування рухомими дебалансами.

Оскільки стаття не присвячена питанням кінематичних взаємодій елементів керованого механічного відцентрового дебалансного збуджувача коливань і механізму керування рухомими дебалансами, то ознайомитися з кінематичними й конструктивними схемами та принципом роботи одного з можливих варіантів обох цих механізмів, які є складовими частинами КМВДЗК, можна в роботі [3].

Постановка завдання

У роботі [2] розглянуто один з можливих варіантів КМВДЗК, кінематична схема котрого наведена на рисунку 1, отримано відповідну математичну модель і виявлено особливості динамічної дії цього віброзбуджувача. При складанні зазначеної математичної моделі за допомогою векторної форми визначення рухів елементів віброзбуджувача, останній розглядають як механічну систему, до складу якої входять дебалансний вал 1, нерухомий (відносно вала 1) дебаланс 2 масою m та два рухомі дебаланси 3 і 4 масою $m/2$ кожний, посаджені на вал 1 ковзною посадкою та з'єднані з ним кульковими шпон-

ками 5, котрі можуть перекочуватися у гвинтових канавках 6, виконаних на поверхні вала 1. Прийнято, що вал 1 обертається рівномірно навколо своєї поздовжньої осі з кутовою швидкістю

$$\omega_{\text{роб}} = \omega = \text{const},$$

а вектор прискорення \vec{a}_i довільної точки M_i будь-якого з дебалансів становить

$$\vec{a}_i = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_i), \quad (1)$$

де $\vec{r}_i = \vec{i} \cdot x_i + \vec{j} \cdot y_i + \vec{k} \cdot z_i$ – радіус-вектор, що визначає положення цієї точки відносно початку відліку; \vec{i} , \vec{j} і \vec{k} – орти декартових координатних осей.

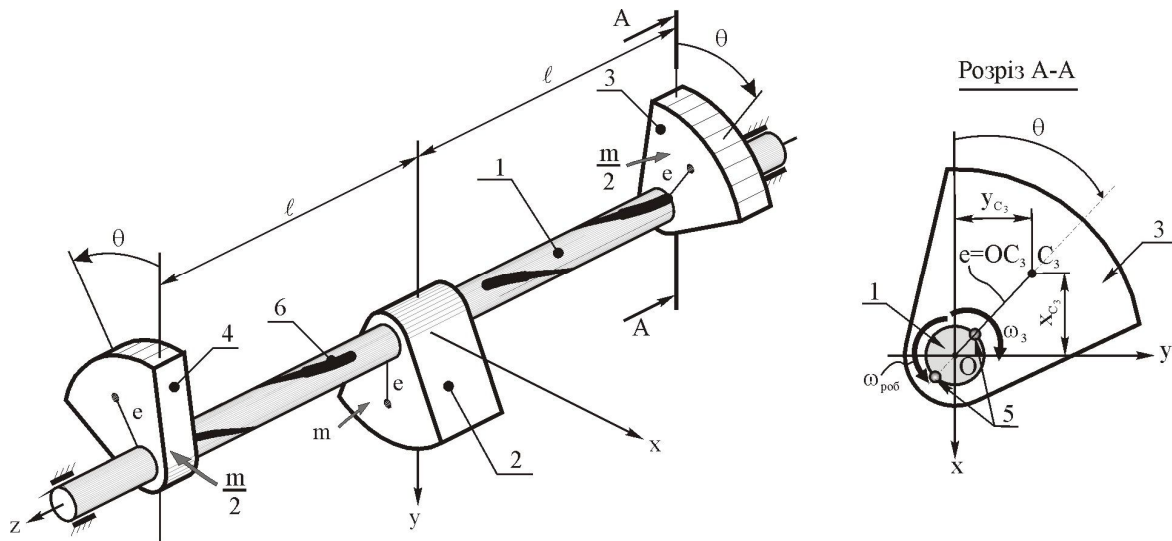


Рис. 1. Кінематична схема КМВДЗК (варіант)

Такі припущення приводять до того, що вектори $\vec{\Phi}_i$ (довільної точки M_i), $\vec{\Phi}_2$, $\vec{\Phi}_3$ і $\vec{\Phi}_4$ (кожного з дебалансів), які в такому разі є відцентровими силами інерції вказаних матеріальних об'єктів, визначаються залежностями:

$$\begin{aligned} \vec{\Phi}_i &= -m_i \cdot \vec{a}_i = -m_i \cdot [\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_i)] = m_i \cdot [(\vec{\omega} \times \vec{r}_i) \times \vec{\omega}] = \\ &= m_i \cdot (\vec{\omega} \times \vec{r}_i) \times \vec{\omega} = (\vec{\omega} \times m_i \cdot \vec{r}_i) \times \vec{\omega}, \\ \vec{\Phi}_2 &= m \cdot \omega^2 \cdot (\vec{i} \cdot x_{C_2} + \vec{j} \cdot y_{C_2}) \end{aligned} \quad (2)$$

та
$$\vec{\Phi}_3 = -\vec{\Phi}_4 = \frac{m}{2} \cdot \omega^2 \cdot (\vec{i} \cdot x_{C_3} + \vec{j} \cdot y_{C_3}),$$

а модулі сил інерції дебалансів –

$$\Phi_2 = m e \cdot \omega^2$$

та
$$\Phi_3 = \Phi_4 = \frac{m e \cdot \omega^2}{2},$$

де x_{C_i} , y_{C_i} та e – координати центра мас та ексцентриситет кожного з дебалансів.

Як відомо, у загальному випадку сили $\vec{\Phi}_2$, $\vec{\Phi}_3$ та $\vec{\Phi}_4$ утворюють динамічний гвинт (або динаму), характеризуваними параметрами котрого є головний вектор $\vec{\Phi}$ і головний момент \vec{M}_O інерційних сил,

які у сукупності й визначають загальну вібродинамічну дію КМВДЗК на оброблюване середовище.

Для вказаного варіанта КМВДЗК модулі вказаних параметрів, котрі й є математичною моделлю динамічної дії, дорівнюють

$$\Phi = 2m e \omega^2 \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

і
$$M_O = m e \omega^2 \frac{h}{2\pi} \cdot \theta \cdot \sin \theta, \quad (4)$$

де θ – кут, що визначає положення кожного рухомого дебалансу відносно свого початкового положення, яке відповідає зрівноваженому стану КМВДЗК; h – крок гвинтових канавок 6, котрий згідно з роботою [4] визначається через діаметр d дебалансного вала 1 за формулою

$$h = \pi d / \text{tg} \gamma,$$

де γ – кут нахилу гвинтової канавки 6 до поздовжньої осі вала 1.

Зауважимо, що обертання кожного рухомого дебалансу на кут θ відбувається одночасно з його переміщенням уздовж осі дебалансного вала 1 на віддаль ℓ ; зазначені переміщення обох дебалансів жорстко синхронізовані ходовим гвинтом (див. далі

позицію 10 на рис. 3), при обертанні якого кожний дебаланс приводиться в рух своєю вилкою (див. далі позицію 11 на рис. 3). І ходовий гвинт, і вилки є конструктивними елементами механізму керування рухомими дебалансами ([3]).

Неважко зрозуміти, що отримана в такий спосіб математична модель ураховує вплив на загальну вібродинамічну дію КМВДЗК лише положення рухомого дебалансу (яке визначається параметром θ), але ніяк не враховує рух цього матеріального об'єкта. По суті, формули (3) і (4) визначають динамічну дію КМВДЗК у якомусь конкретному (незмінному відносно дебалансного вала 1) положенні кожного рухомого дебалансу. Звісно, що така математична модель не описує нестационарного режиму роботи вібробудувача.

Метою роботи є: 1) механо-математичне дослідження руху елементів КМВДЗК під час нестационарного режиму його роботи; 2) аналіз отриманих результатів; 3) розроблення та створення системи автоматичного керування рухомими дебалансами.

Основний матеріал і результати

Застосовуючи необхідні положення теоретичної механіки, розглянемо нестационарний режим роботи КМВДЗК. Установлюємо, що оскільки механіка руху дебалансу 2 аналогічна до розглянутої вище, то його відцентрова сила інерції

$$\vec{\Phi}_2 = m \cdot \omega^2 \cdot (\vec{i} \cdot x_{C_2} + \vec{j} \cdot y_{C_2}),$$

а рухомий дебаланс 3 (так само, як і дебаланс 4) виконує складний рух, через що прискорення \vec{a}_i довільної точки M_i цього дебалансу згідно з теоремою Коріоліса визначається векторною сумою

$$\vec{a}_i = \vec{a}_{ie} + \vec{a}_{ir} + \vec{a}_{iCor}, \quad (5)$$

де \vec{a}_{ie} , \vec{a}_{ir} , \vec{a}_{iCor} – відповідно вектори переносного, відносного та коріолісового прискорень цієї точки.

Тому що переносним рухом для дебалансу 3 і для його довільної точки є обертання вала 1, то

$$\omega_e = \omega_{роб} = \omega = \text{const}, \quad \vec{\omega}_e = \vec{k} \cdot \omega, \quad \varepsilon_e = \dot{\omega} = 0$$

та

$$\vec{a}_{ie} = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_i) = \vec{k} \cdot \omega \times (\vec{k} \cdot \omega \times \vec{r}_i). \quad (6)$$

Відносний рух дебалансу 3 також є складним і складається з двох рухів:

1) обертального руху навколо поздовжньої осі вала 1 з кутовою швидкістю $\omega_{r3} = \dot{\theta}$, яка визначається кутовою швидкістю обертання ходового гвинта 10;

2) прямолінійного поступального руху вздовж тієї ж осі зі швидкістю $\vec{V}_{r3\text{пост.}}$, значення котрої згідно з роботою [4] дорівнює

$$\vec{V}_{r3\text{пост.}} = \pm \vec{k} \cdot \lambda \cdot \dot{\theta},$$

де $\lambda = h/(2 \cdot \pi)$.

Оскільки при нестационарному режимі роботи КМВДЗК дебаланс 3 для зміни напрямку свого руху має періодично зупинятися у двох певних положеннях, то зрозуміло, що обидва вказані рухи є нерівномірними і, отже,

$$\omega_{r3} = \dot{\theta} \neq \text{const}, \quad \varepsilon_{r3} = \ddot{\theta} \quad \text{і} \quad \vec{\varepsilon}_{r3} = \pm \vec{k} \cdot \ddot{\theta},$$

а

$$\vec{V}_{r3\text{пост.}} = \lambda \dot{\theta} \neq \text{const},$$

$$\vec{a}_{r3\text{пост.}} = \lambda \ddot{\theta} \quad \text{і} \quad \vec{a}_{r3\text{пост.}} = \pm \vec{k} \lambda \ddot{\theta}.$$

Тоді вектор відносного прискорення точки M_i буде визначатися сумою

$$\vec{a}_{ir} = \vec{a}_{ir\text{об.}} + \vec{a}_{ir\text{пост.}},$$

де $\vec{a}_{ir\text{об.}}$ – вектор прискорення обертальної частини відносного руху; $\vec{a}_{ir\text{пост.}}$ – вектор прискорення поступальної частини відносного руху, значення яких

$$\begin{aligned} \vec{a}_{ir\text{об.}} &= \vec{\varepsilon}_{r3} \times \vec{r}_i + \vec{\omega}_{r3} \times (\vec{\omega}_{r3} \times \vec{r}_i) = \\ &= \pm \vec{k} \cdot \ddot{\theta} \times \vec{r}_i \pm \vec{k} \cdot \dot{\theta} \times (\pm \vec{k} \cdot \dot{\theta} \times \vec{r}_i) \end{aligned} \quad (7)$$

та

$$\vec{a}_{ir\text{пост.}} = \vec{a}_{r3\text{пост.}} = \pm \vec{k} \cdot \lambda \cdot \ddot{\theta}. \quad (8)$$

Вектор коріолісового прискорення точки M_i визначається залежністю

$$\vec{a}_{iCor} = 2 \cdot (\vec{\omega}_e \times \vec{V}_{ir}),$$

де \vec{V}_{ir} – вектор відносної швидкості точки M_i , який аналогічно до \vec{a}_{ir} визначається векторною сумою

$$\vec{V}_{ir} = \vec{V}_{ir\text{об.}} + \vec{V}_{ir\text{пост.}},$$

де $\vec{V}_{ir\text{об.}} = \vec{\omega}_{r3} \times \vec{r}_i = \pm \vec{k} \cdot \dot{\theta} \times \vec{r}_i$ – вектор швидкості обертальної частини відносного руху; $\vec{V}_{ir\text{пост.}} = \vec{V}_{r3\text{пост.}} = \pm \vec{k} \cdot \lambda \cdot \dot{\theta}$ – вектор швидкості поступальної частини відносного руху, з урахуванням чого дістанемо

$$\vec{V}_{ir} = (\pm \vec{k} \cdot \dot{\theta} \times \vec{r}_i) \pm \vec{k} \cdot \lambda \cdot \dot{\theta} = \dot{\theta} \cdot (\pm \vec{k} \times \vec{r}_i \pm \vec{k} \cdot \lambda)$$

та

$$\vec{a}_{iCor} = 2 \cdot [\vec{k} \cdot \omega \times \dot{\theta} \cdot (\pm \vec{k} \times \vec{r}_i \pm \vec{k} \cdot \lambda)]. \quad (9)$$

Підставляючи значення (6)÷(9) у формулу (5), групуючи й виконуючи легітимні математичні перетворення, можна отримати формулу, котра і визначатиме вектор \vec{a}_i довільної точки M_i дебалансу 3 під час нестационарного режиму роботи КМВДЗК. Опускаючи цю досить громіздку частину дослідження, неважко зрозуміти, що отриманий вираз матиме значно складніший вигляд порівняно із залежністю (1). Після визначення \vec{a}_i за наведеними вище формулами можна знайти відповідні сили інерції $\vec{\Phi}_1$, $\vec{\Phi}_3$ і $\vec{\Phi}_4$, які будуть визначатися адекватними до вигляду \vec{a}_i виразами.

Таким чином, при нестационарному режимі роботи керований вібробудувач генерує систему сил інерції $\{\vec{\Phi}_2; \vec{\Phi}_3; \vec{\Phi}_4\}$, котра за кожний цикл вібродії зазнає значно суттєвіших змін як за величиною (мо-

дулем) сумарної дії, так і за напрямком цієї дії, що, безумовно, позитивно впливає на вібротехнологічний процес. При цьому визначальними для стану цього процесу будуть параметри:

- 1) кутова швидкість ω обертання дебалансного вала 1;
- 2) маси m нерухомого та $m/2$ кожного з рухомих дебалансів;
- 3) ексцентриситет e кожного з дебалансів;
- 4) кутові швидкість $\omega_{r3} = \dot{\theta}$ і прискорення $\epsilon_{r3} = \ddot{\theta}$ відносного обертання дебаланса 3;
- 5) діаметр d дебалансного вала 1;
- 6) кут γ нахилу гвинтової канавки 6 до по-
вздожньої осі вала 1.

Звісно, що і математичні моделі нестационарного режиму роботи КМВДЗК будуть мати відмінний від формул (3) і (4) вигляд.

Для реалізації нестационарних режимів роботи КМВДЗК були розроблені, створені та випробувані системи автоматичного керування рухомими дебалансами. Спочатку був розроблений електронний пристрій, елементи якого знаходилися поза вібромашиною. Керування електромагнітним реле, яке перемикало виводи обмоток статора асинхронного реверсивного двигуна РД-09, відбувалося транзисторним мультівібратором, який працював у автоколивальному режимі, генеруючи імпульси прямокутної форми, довгота та період чергування яких визначалися параметрами C і R відповідних елементів пристрою. Надійної та стабільної роботи цього пристрою досягти не вдалося через різноманітні причини: коливання напруги живлення та температури зовнішнього середовища, розкид параметрів транзисторів тощо.

Остаточно була розроблена, сконструйована, застосована та досліджена достатньо проста електро-механічна система автоматичного керування рухомими дебалансами, електрична схема якої наведена на рис. 2. На рис. 3 показано розташування елементів цієї системи на конструктивних вузлах (деталях):

- а) вібраційного верстату ВІО-8 [5];
- б) механізму керування рухомими дебалансами та на окремо розташованому пульті керування.

На горизонтальній перегородці 9 (зазначена перегородка є конструктивним елементом корпусу 7 віброверстата та розділяє собою зони розташування КМВДЗК та механізму керування рухомими дебалансами) закріплені кнопкові натискні вимикачі: нормально розімкнутий SB1 та два нормально замкнуті SB2 та SB3; при цьому вимикач SB2, що закріплений за допомогою кронштейна 17, має можливість бути розташованим і зафіксованим у різних поло-

женнях. Кожне зазначене положення визначає нижню межу діапазону нестационарного режиму динамічної дії КМВДЗК та обирається залежно від потреб того чи іншого технологічного процесу. Вимикач SB3 закріплений таким чином, що у початковому крайньому лівому положенні 11' правої вилки механізму керування рухомими дебалансами (яке визначає зрівноважений стан КМВДЗК) контакти цього вимикача розімкнуті. Реверсивний електродвигун РД-09 (позиція 13) за допомогою вертикальної пластини 15 і трьох шпильок 16 укріплений на корпусі 7 так, що ходовий гвинт 10 і вал 14 двигуна РД-09, з'єднані муфтою 12, розташовані співвісно.

Розглянемо роботу сконструйованої системи автоматичного керування. Після пуску КМВДЗК у зрівноваженому стані та «виходу» дебалансного вала на усталену кутову швидкість $\omega_{роб}$ робочого режиму необхідного технологічного процесу на пульті керування вимикачем SA1 подається живлення на обмотки трансформатора T1 і короткочасно натискається вимикач із самоповерненням S1. Відбувається короткочасне замикання електричного ланцюга I обертання за рухом годинникової стрілки вала 14, який через муфту 12 починає адекватно обертати ходовий гвинт 10, а різьове з'єднання гвинта 10 з правою вилкою 11 змушує цю вилку рухатися праворуч, що призводить до вивільнення кнопки вимикача SB3, у результаті чого контакти цього вимикача замикають електричний ланцюг I незалежно від вимикача S1. Подальше обертання вала 14 забезпечує подальший неперервний рух праворуч вилки 11, що спричиняє відповідний рух пов'язаного з нею рухомого дебаланса 3, збільшення незрівноваженості КМВДЗК й інтенсивності вібродії, що ним генерується. Коли розглядувана вилка досягає свого крайнього правого положення 11" (яке відпо-

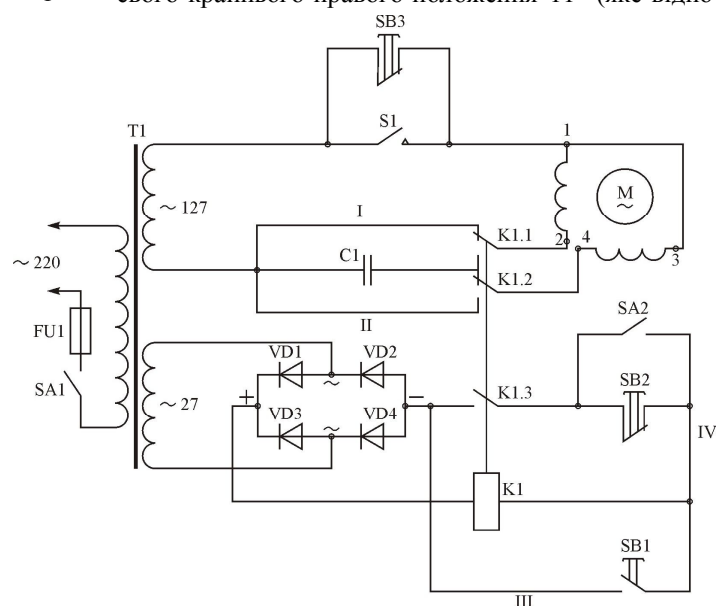
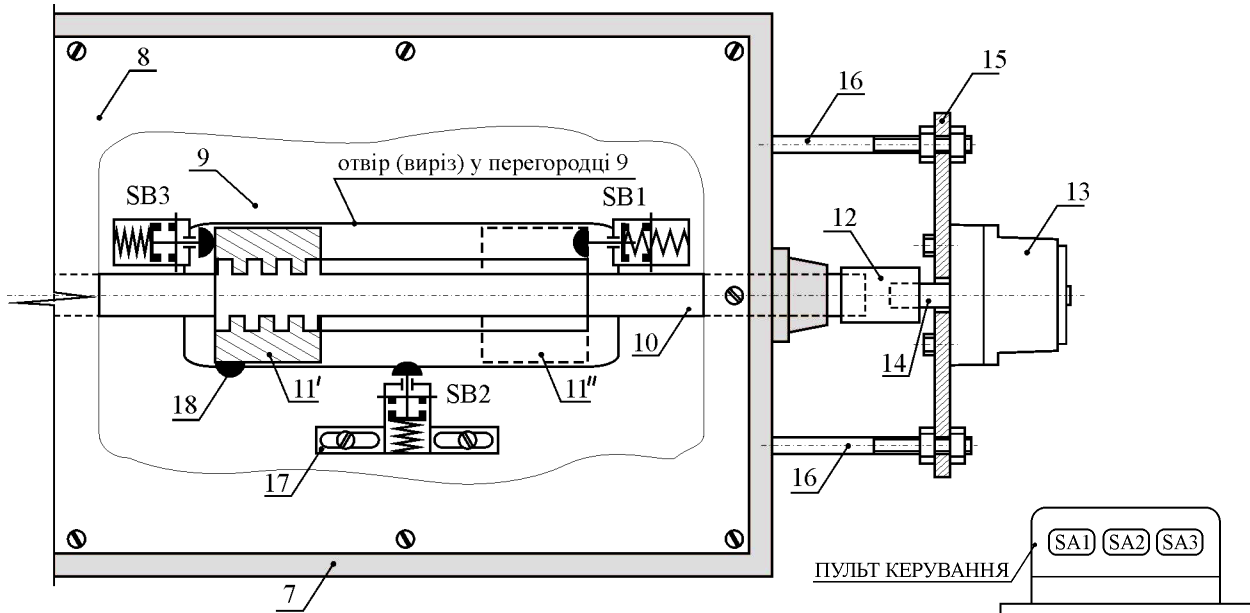


Рис. 2. Електрична схема системи автоматичного керування рухомими дебалансами

відає максимальній незрівноваженості КМВДЗК), вона натискає кнопку вимикача SB1, контакти якого замикають ланцюг III живлення електромагнітного реле K1; реле спрацьовує та: а) контактом K1.2 замикає ланцюг II обертання вала 14 проти руху годинникової стрілки; б) контактом K1.3 самоблокується, замикаючи ланцюг IV живлення реле. У результаті ходовий гвинт 10 починає обертатися проти руху годинникової стрілки, змушуючи вилку 11 ру-

хатися ліворуч (при цьому відповідно зменшується інтенсивність вібродії КМВДЗК) до моменту «зустрічі» її сферичного виступу 18 з кнопкою вимикача SB2, при натисканні якої контакти вимикача SB2 розмикаються, знеструмлюючи ланцюг IV живлення реле K1. У цю мить усі контакти реле повертаються у свої вихідні положення, що забезпечує замикання ланцюга I контактом K1.1, зміну напрямку обертання ходового гвинта 10 та рух праворуч вилки 11.



Деталі вібраційного верстату ВІО-8: 7 - корпус віброверстату;
8 - кришка корпусу віброверстату; 9 - горизонтальна перегородка корпусу віброверстату.
Деталі механізму керування рухомими дебалансами: 10 - ходовий гвинт;
11 - права вилка керування відповідним рухомим дебалансом; 12 - з'єднувальна муфта;
13 - реверсивний електродвигун РД-09; 14 - вал електродвигуна РД-09; 15 - пластина; 16 - шпилька.
17 - кронштейн вимикача SB2; 18 - сферичний виступ.

Рис. 3. Елементи системи автоматичного керування рухомими дебалансами

Таким чином, вилка 11 буде виконувати зворотно-поступальний рух між кнопковими вимикачами SB1 і SB2 до наступного зовнішнього втручання в стан елементів електромеханічної системи автоматичного керування рухомими дебалансами. При цьому КМВДЗК буде генерувати нестационарний режим, вібраційна дія якого визначається:

- 1) геометричними, кінематичними та динамічними параметрами елементів КМВДЗК;
- 2) кінематичними характеристиками зворотно-обертального руху ходового гвинта 10, які повністю визначаються паспортними характеристиками реверсивного двигуна 13; 3) місцем розташування кронштейна 17 з вимикачем SB2.

Після закінчення часу, необхідного для якісного виконання того чи іншого вібротехнологічного процесу, на пульті керування замикають контакти вимикача SA2, тим самим шунтуючи вимикач SB2. У результаті при найближчій черговій «зустрічі» сферичного виступу 18 з кнопкою вимикача SB2 ланцюг IV живлення реле K1 не знеструмлюється, реверсу не

відбувається, а вилка 11 продовжує свій рух ліворуч до свого початкового крайнього лівого положення 11', при досягненні якого натискається кнопка вимикача SA3, що знеструмлює електричний ланцюг II живлення реверсивного двигуна 13, який, звісно, повністю зупиняється. На пульті керування остаточно:

- 1) вимикають вимикач SA1, що знеструмлює ланцюг живлення реле K1, усі контакти якого автоматично повертаються у свої початкові положення;
- 2) повертають у початкове положення вимикач SA2.

Отже, вся система автоматичного керування рухомими дебалансами виявляється у вихідному стані.

Розроблена система свого часу була випробувана та успішно впроваджена у виробничий процес одного з номерних заводів м. Полтави для управління керованим механічним відцентровим дебалансним збуджувачем коливань, який приводив у рух робочий орган верстату ВІО-8 для оздоблювально-зачисної обробки (ОЗО) невеликих за розміром і

масою деталей. У ємностях цього верстата у вібро-ючих абразивних гранулах відбувалися технологічні операції: а) зняття задирків або заокруглення гострих ребер деталей після операцій штампування, різання та свердлення; б) шліфування та полірування поверхонь деталей.

На рис. 4 наведено фото реального розміщення елементів розробленої системи на корпусі реального віброверстату ВІО-8.

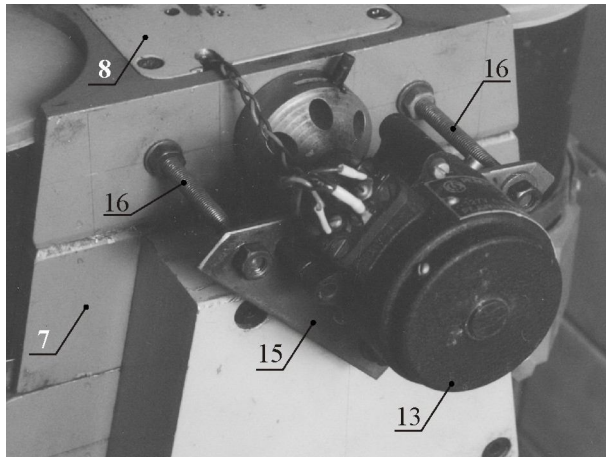


Рис. 4. Фото елементів системи автоматичного керування рухомими дебалансами віброверстату ВІО-8

ВИСНОВКИ

При реалізації нестационарного режиму роботи керованого механічного відцентрового дебалансно-го збуджувача коливаний останній генерує на оброблюване середовище вібраційну дію, котра за кожний свій цикл є енергетично більш насиченою порівняно з будь-яким стаціонарним режимом. У цьому разі

розсіювання енергії у оброблюваному середовищі (яке складається з суміші абразивних гранул і оброблюваних деталей) відбувається суттєво інтенсивніше, що приводить до відповідного підвищення ефективності вібродії. Застосування нестационарних режимів роботи віброверстату ВІО-8 у згаданому вище технологічному процесі дозволило скоротити час оздоблювально-зачисної обробки на 20...25% [5].

Список літератури

1. Serdyuk L. *The controlled vibromachines* / L. Serdyuk // *Jubilee scientific conferens. University of architecture, civil engineering and geodezy.* – Sofia : UACIG, 2007. – P. 43 – 48.
2. Сердюк Л. И. *Повышение надежности и долговечности вибрационной техники с использованием управляемых вибрационных машин* / Л.И. Сердюк, В.А. Онищенко // *The improvement of the quality, reliability and long usage of technical systems, and technological processes.* – Hurghada, 2007. – P. 47 – 51.
3. Жигилій С.М. *Динаміка дебалансного вала керованого віброзбуджувача УВВ-02* / С.М. Жигилій, К.С. Дяченко // *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво.* – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Вип. 1 (31). – С. 186 – 193.
4. Жигилій С.М. *Определение кинетической энергии дебалансного вала управляемого вибровозбудителя при составлении математической модели вибромашины* / С.М. Жигилій // *Вибрации в технике и технологиях.* – Винница: 1999, №2(11). – С. 16 – 23.
5. Жигилій С.М. *Управляемая вибрационная машина для подготовки металлической фибры: автореф. дис. канд. техн. наук* / С.М. Жигилій / *Полтавский государственный технический университет.* – Полтава, 1997. – 16 с.

Надійшла до редколегії 26.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, доц. Б.О. Коробко, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ДЕБАЛАНСАМИ МЕХАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ

С.М. Жигилій, А.Є. Зима, Н.С. Педько

Рассмотрены особенности динамического воздействия на обрабатываемую среду нестационарного режима работы управляемого механического центробежного дебалансного возбудителя колебаний (УМЦДВ), так как только такой вибровозбудитель способен создавать указанный нестационарный режим. Доказано более высокую насыщенность и эффективность механического воздействия, генерируемое УМЦДВ при применении нестационарного режима его работы. Приведены электрическая и кинематическая схемы разработанной системы автоматического управления подвижными дебалансами. Рассмотрено и объяснено работу этой системы. Указано на параметры, которые определяют общее динамическое воздействие нестационарных режимов на обрабатываемую среду.

Ключевые слова: управляемый механический центробежный дебалансный возбудитель колебаний, подвижный дебаланс, динамическое воздействие, нестационарный режим вибрационного воздействия, система автоматического управления подвижными дебалансами.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF MOVABLE UNBALANCES OF MECHANICAL CENTRIFUGAL VIBRATION EXCITER

S.M. Zhyhylii, O.Ye. Zyma, M.S. Pedko

Features of dynamic action on the treated environment of the non-stationary operational mode of a controlled mechanical centrifugal unbalanced vibration exciter (CMCNVE) were considered in the article. Only such type of vibration exciter can create the specified non-stationary mode. The higher saturation and efficiency of mechanical action generated by CMCNVE at the application of non-stationary mode of its operation was proved. The electric and kinematic schemes of the movable unbalances automatic control developed system were given. This system was considered and explained in the paper. The parameters that determine the overall dynamic action of non-stationary regimes on the treated environment were specified.

Keywords: controlled mechanical centrifugal unbalanced vibration exciter, movable unbalance, dynamic action, non-stationary mode of vibration action, automatic control system of movable unbalances.

УДК 62.7:519.2

И.М. Коржов, О.Ю. Кропачек

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР СИСТЕМОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИБРОСИГНАЛОВ СРЕДСТВАМИ LABVIEW

В статье рассмотрена компьютеризированная реализация процедуры альтернативной диагностики состояния сложных промышленных вибрационных объектов. Представлена реализация получения тестовых V- и W-статистик, отражающих энергетическую составляющую сигнала и скорость изменения этой составляющей соответственно. Разработаны и исследованы алгоритмы получения коэффициента $R_{\xi\eta}$ взаимной спектральной нестационарности как критерия диагностики сложных промышленных вибрационных объектов.

Ключевые слова: вибросигнал, диагностика промышленных объектов, тестовая статистика, вычислительная процедура, LabView.

Введение

Постановка проблемы. Незаражающий контроль и безразборная диагностика является наиболее перспективными направлениями при построении современных систем контроля и управления. Алгоритмы, которые реализуют указанные технологии, основаны на обработке измерительной информации от датчиков, которые установлены на важные узлы сложных промышленных объектов.

Одними из наиболее распространенных сигналов, которые используют при безразборной диагностике, являются измерительные вибрационные сигналы [1, 2].

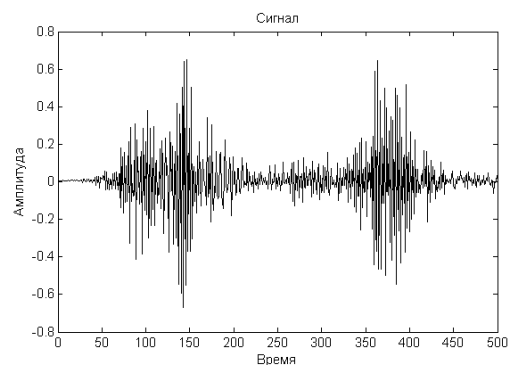
Вибрационные сигналы всегда содержат существенную случайную высокочастотную составляющую, поэтому оценка характеристик указанной составляющей является важным моментом при обработке измерительных сигналов. Традиционно в подобных случаях используют спектральное преобразование таких высокочастотных сигналов, а в последнее время вейвлет-преобразование, имеющее ряд преимуществ перед другими спектральными преобразованиями такими, как преобразование Фурье, оконное преобразование Фурье [3, 4].

В статье приведена реализация алгоритмов альтернативной функциональной диагностики средствами LabView для построения систем контроля, диагностики, идентификации бортовой (стендовой) информационно-измерительной системы, оценивающей состояние топливной системы дизелей [5].

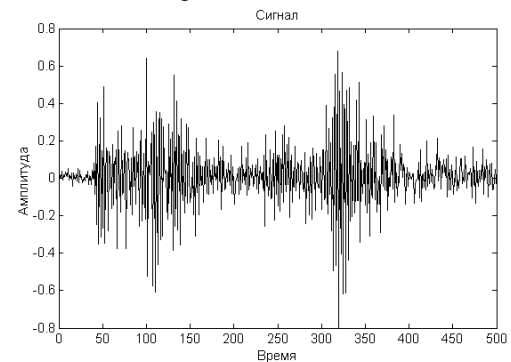
Цель статьи. Реализация методов многофакторного дисперсионного анализа для вычислительных процедур системного информационного преобразования спектрально нестационарных вибросигналов в задаче альтернативной функциональной диагностики дизельных двигателей большой мощности.

Исследование первичных измерительных стохастических нестационарных вибросигналов

На рис. 1 представлены исходные вибросигналы пьезоэлектрического акселерометра АП-18, установленного на трубку топливного насоса высокого давления дизельного двигателя Д80 тепловозов ТГМ4 для двух состояний топливной системы: а – рабочего (в нормальном состоянии S_0) и б – с неисправностью (с нарушением состояния S_1) [6].



а – рабочее состояние



б – неисправное состояние

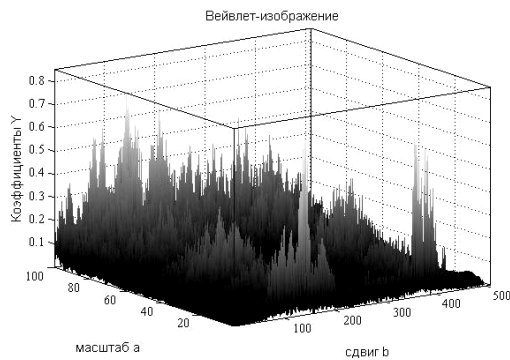
Рис. 1. Вибросигналы различных состояний топливной системы дизельных двигателей

Спектральное разложение этих сигналов реализовано на основе вейвлет-преобразования [7]:

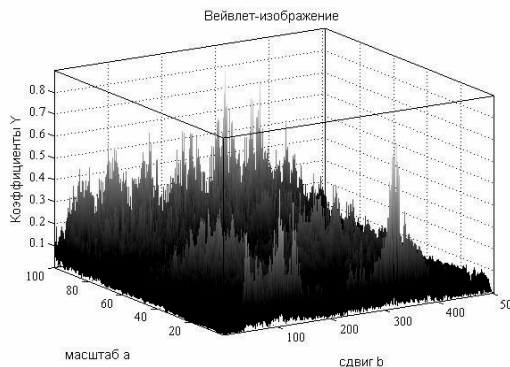
$$W_{g_n}(a_1, b_q)Z = a_1 / \sqrt{C_{g_n} |a_1|} \times \sum_{k=1}^N z_k \left[g_{n-1}(t_{k-1} - b_q) / a_1 - g_{n-1}(t_k - b_q) / a_1 \right], \quad (1)$$

где $W_{g_n}(\bullet)Z$ – вейвлет-коэффициент, соответствующий величинам масштаба a_1 и сдвига b_q при вейвлет-преобразовании процесса $Z(t)$, $z_k = x_k$ (если $Z(t) = X(t)$), $z_k = y_k$ (если $Z(t) = Y(t)$), $g_{n-1}(t)$ – гауссовский материнский вейвлет ($n-1$) порядка, C_{g_n} – нормирующий множитель, z_k – отсчеты (реализации) процесса $Z(t)$, $k = \overline{1, N}$.

Непрерывные вейвлет-преобразования этих сигналов, осуществленные в соответствии с математической моделью (1), представлены на рис. 2. Вариант а соответствует, б – с функциональным нарушением S_1 в работе топливной системы.



а – рабочее состояние S_0



б – функциональное нарушение S_1

Рис. 2. Вейвлет-изображения соответствующих состояний топливной системы

Выражение (1) позволяет сформировать двумерное, в пространстве масштаба a и сдвига b , множество коэффициентов $W_{sl} = W_{g_k}(a_s, b_l)x$, где $s = \overline{1, S}$, $l = \overline{1, L}$. Используя сечения такого двумерного множества отдельно по a и отдельно по b ,

получают два набора одномерных последовательностей W_{sl} при условиях, соответственно, $a_s = \text{const}$, $s = \overline{1, S}$, $b = \overline{b_1, b_L}$ и $b_l = \text{const}$, $l = \overline{1, L}$, $a = \overline{a_1, a_S}$.

Эти последовательности коэффициентов $\{W_{sl}\}_1^L, \dots, \{W_{sl}\}_1^L$ и $\{W_{sl}\}_1^S, \dots, \{W_{sl}\}_1^S$ и служат вектором входных сигналов диагностической системы [8].

Моделирование вычислительных процедур получения тестовой V-статистики

Автоматическое определение мощности исходного вибросигнала $X(t_i)$ (рис. 1) осуществляется на основе тестовой V-статистики:

$$V = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^2 / \sigma_0^2 - 1) / \sqrt{0.5K_{\varepsilon(0)} + 1}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_i = \overset{\circ}{x}(t_i)$ – центрированное значение вибросигнала $X(t_i)$, σ_0^2 – дисперсия исходного вибросигнала для состояния S_0 , $K_{\varepsilon(0)}$ – кумулянтный коэффициент эксцесса исходного вибросигнала $X(t)$, если состояние объекта вибродиагностики $S \in S_0$.

Компьютерная реализация этой статистики средствами LabView выполнена в виде виртуального прибора (ВП), пиктограмма которого представлена на рис. 3, блок-диаграмма на рис. 4.

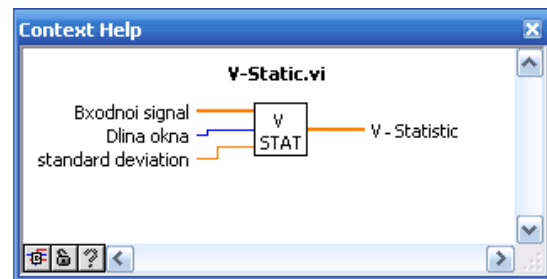


Рис. 3. Пиктограмма ВП V-статистики

ВП V-статистика имеет три входных переменных (рис. 3):

- 1) входной сигнал ε_i , представленный одномерным массивом переменных типа double (вещественные числа с плавающей запятой, 64 бита);
- 2) длина окна n (переменная типа byte, 8 бит, которая может принимать целочисленные значения от 1 до 127, рис. 5);
- 3) дисперсия исходного вибросигнала σ_0^2 (переменная типа double, числа с плавающей запятой, 64 бита).

Выходной сигнал ВП – это вычисленные значения V-статистики в виде одномерного массива переменных типа double (вещественные числа с плавающей запятой, 64 бита).

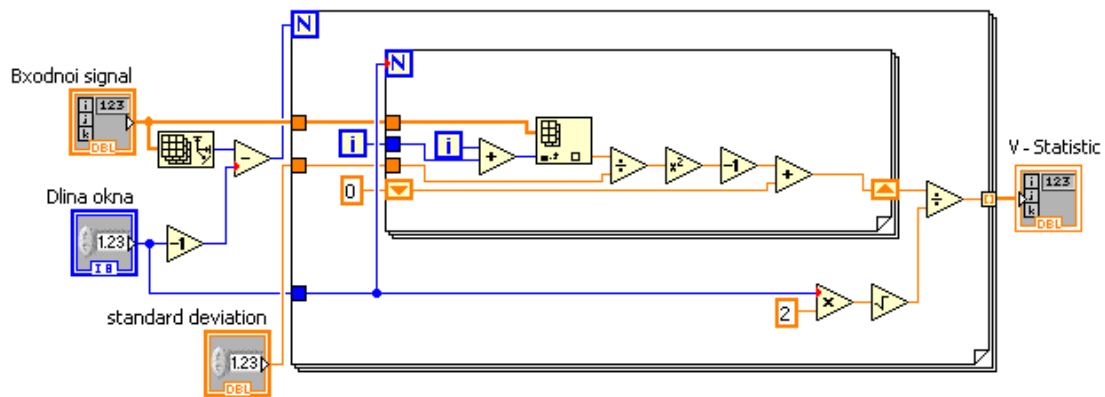


Рис. 4. Блок-диаграмма ВП V-статистики

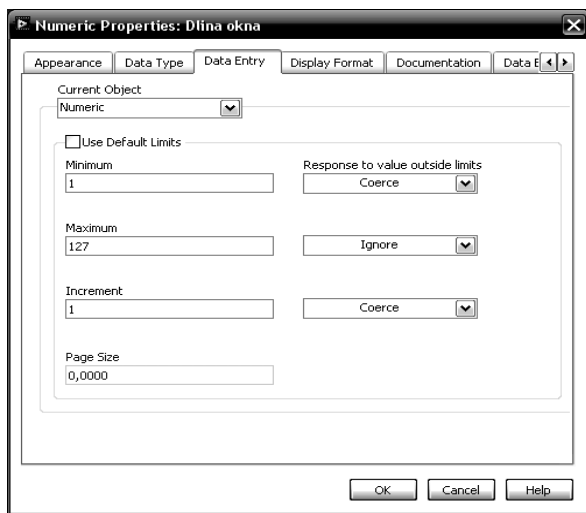
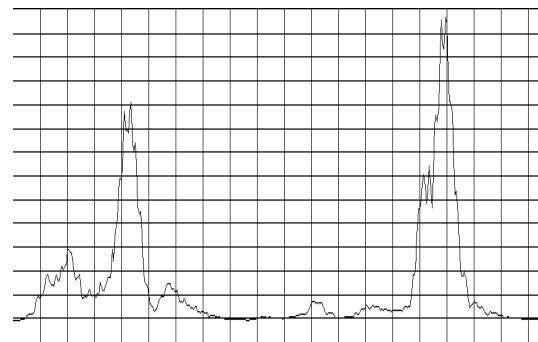


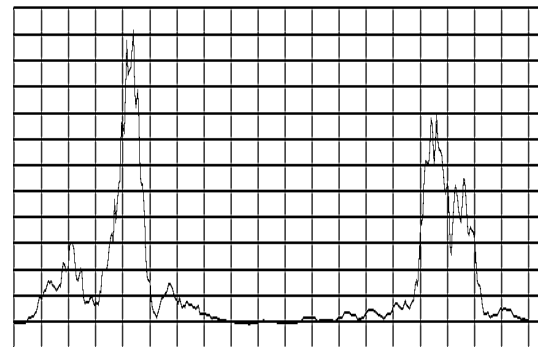
Рис. 5. Ограничения возможных значений длины окна n

Для реализации формулы (2) использовано два цикла типа For Loop, один из которых (внутренний) вложен в другой (внешний). Вложенный цикл реализует разложение одномерного массива входного сигнала на конкретные значения ϵ_i (которые находятся в окне в данный момент) с последующим вычислением квадрата отношения значения ϵ_i с дисперсией исходного вибросигнала для состояния S_0 и вычитанием из него единицы. Вложенный цикл повторяется n-раз (определяется длиной окна) с накоплением суммы вычисляемых разниц. После выдачи вложенным циклом значения суммы вычисленных разниц, во внешнем цикле вычисляется отношение выданного значения с квадратным корнем удвоенной длиной окна n, для получения значения V-статистики для актуального расположения окна. Внешний цикл повторяется до тех пор пока окно не достигнет конца сигнала (количество итераций на единицу больше разницы длины сигнала и длины окна n), первая итерация внешнего цикла соответствует расположению окна в начале сигнала и охватывает n первых значений ϵ_i , а последняя – n последних значений ϵ_i , т.е. выходная V-статистика будет иметь количество значений на единицу больше разницы длины сигнала и длины окна n.

Результаты применения ВП V-статистики для вибросигналов, соответствующих рабочему (а) и неисправному состоянию (б) топливной системы дизельных двигателей приведены на рис. 6.



а – рабочее состояние



б – функциональное нарушение

Рис. 6. V-статистики для вибросигналов топливной системы дизельных двигателей

Моделирование вычислительных процедур получения тестовой W-статистики

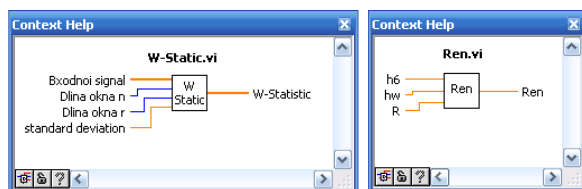
Статистика V позволяет получать информацию и о мгновенной скорости W изменения мощности вибросигнала

$$W = r^{-1} \left(0.5K_{\mathcal{E}(0)} + 1 \right)^{-1/2} \cdot \left\{ \sum_{i=n+1}^{n+r} \left(\frac{\epsilon_i}{\sigma_0} \right)^2 - \sum_{i=1}^r \left(\frac{\epsilon_i}{\sigma_0} \right)^2 \right\},$$

усредненной для r отсчетов сдвига между двумя последовательными V-статистиками.

Реализация алгоритма W-преобразования средствами LabView представлена на рис. 7, а (пиктограмма) и рис. 8 (блок-диаграмма). ВП W-статистика имеет четыре входных переменных:

- 1) входной сигнал ε_i , представленный одномерным массивом переменных типа double (вещественные числа с плавающей запятой, 64 бита);
- 2) длина окна n (переменная типа byte, 8 бит, которая может принимать целочисленные значения от 1 до 127, рис. 5);
- 3) длина окна r (переменная типа byte, 8 бит, которая может принимать целочисленные значения от 1 до 127, аналогично рис. 5);
- 4) дисперсия исходного вибросигнала σ_0^2 (переменная типа double, числа с плавающей запятой, 64 бита).



а – W-статистика б – расчёт $R_{\varepsilon\eta}$
Рис. 7. Пиктограммы ВП

Выходной сигнал ВП – это вычисленные значения W-статистики в виде одномерного массива переменных типа double (вещественные числа с плавающей запятой, 64 бита).

ВП W-статистика реализует вычисление согласно формуле (3), для этого использовано три цикла типа For Loop, два из которых (внутренние) вложены в другой (внешний). Вложенные циклы реализуют разложение одномерного массива входного сигнала на конкретные значения ε_i (которые находятся в соответствующих окнах сдвинутые друг по отношению к другу на n) с последующим вычислением квадрата отношения значения ε_i с дисперсией исходного вибросигнала для состояния S_0 . Вложенные циклы повторяются r раз (определяется длиной окна) с накоплением суммы соответствующих квадратов соотношений. После выдачи вложенными циклами значения сумм вычисленных квадратов соотношений, во внешнем цикле вычисляется отношение разницы выданных сумм с удвоенным квадратным корнем из длины окна r , для получения значения W-статистики для актуальных расположений окон. Внешний цикл повторяется до тех пор пока одно из окон не достигнет конца сигнала (количество итераций равно разнице длины

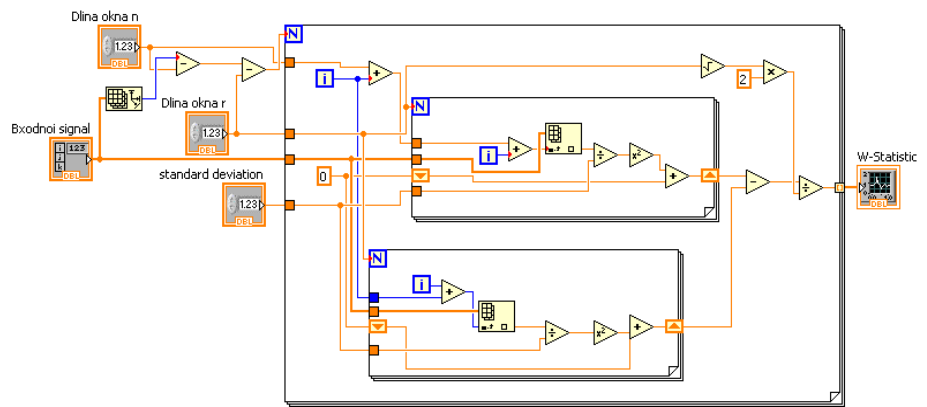
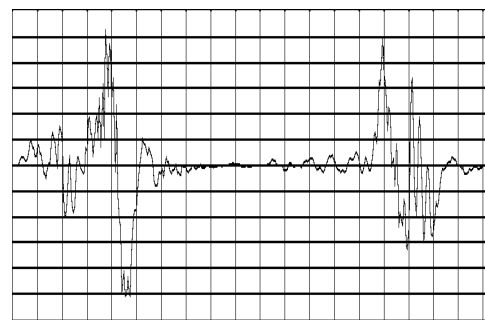


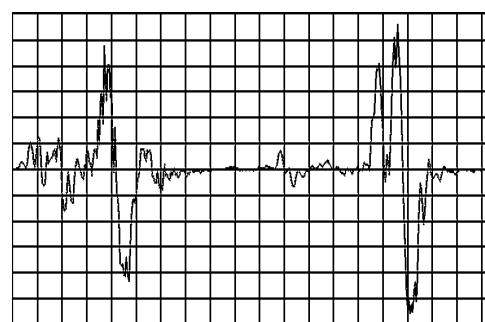
Рис. 8. Блок-диаграмма ВП W-статистики

сигнала и длин окон n и r), первая итерация внешнего цикла соответствует расположению первого окна в начале сигнала и охватывает r первых значений ε_i , а последняя итерация – расположению второго окна с охватом r последних значений ε_i , т.е. выходная W-статистика будет иметь количество значений равное разнице длины сигнала и длин окон n и r .

Результаты применения ВП W-статистики для вибросигналов, соответствующих рабочему (а) и неисправному состоянию (б) топливной системы дизельных двигателей приведены на рис. 9.



а – рабочее состояние



б – функциональное нарушение

Рис. 9. W-статистики для вибросигналов топливной системы дизельных двигателей

Вычисление коэффициента $R_{\varepsilon\eta}$ взаимной спектральной нестационарности

Коэффициент $R_{\varepsilon\eta}$ взаимной спектральной нестационарности, полученный после вейвлет-преобразования [7], на основе выражения

$$R_{\xi\eta} = \frac{1 + (h_{\sigma} h_{\omega})^2 + (1 + h_{\omega}^2) R h_{\sigma}}{\sqrt{(1 + h_{\sigma}^2 + 2 R h_{\sigma}) (1 + h_{\omega}^2 h_{\sigma}^4 + 2 R h_{\omega}^2 h_{\sigma})}} \quad (4)$$

(h_{σ} – отношение дисперсий спектров энергетической составляющей вибросигнала и дисперсий спектров изменения мощности вибросигнала, h_{ω} – отношение частотных составляющих спектров энергетической составляющей вибросигнала и дисперсий спектров изменения мощности вибросигнала, R – парная линейная корреляция спектров, указанных составляющих вибросигнала) является основным параметром критериальной диагностической статистики.

Для получения $R_{\xi\eta}$ (4) создан ВП, пиктограмма которого представлена на рис. 7, б, а блок-диаграмма – на рис. 10.

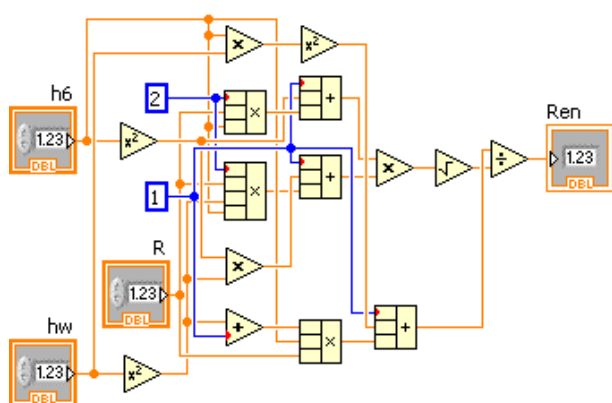


Рис. 10. Блок-диаграмма ВП для расчёта $R_{\xi\eta}$

Выводы

В статье представлена разработка алгоритмического и программного обеспечения информационно-измерительной системы функциональной альтернативной диагностики состояния топливной системы дизельных двигателей большой мощности. Реализованы процедуры получения тестовых V - и W -статистик, составляющих дисперсного преобразования

вибросигналов. Автоматизирована процедура нахождения коэффициента $R_{\xi\eta}$ взаимной спектральной нестационарности как критерия диагностики сложных промышленных вибрационных объектов.

Список литературы

1. Щапов П. Ф. Синтез двумерных диагностических параметров при ковариационном анализе трехмерных вейвлет-преобразований вибросигналов / П.Ф. Щапов, Р.П. Мигуценко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – №3. – С. 69 – 75.
2. Грень Я.В. Вимірювання та аналіз нестационарних вібрацій методами цифрової обробки сигналів: дис. канд. техн. наук: 05.11.01 / Я.В. Грень. – Львів, 1999. – 210 с.
3. Дремін І. М. Вейвлет-аналіз та його використання / І. М. Дремін, О. В. Іванов, В. А. Нечитайло // УФН. – 2001. – Т.171. – №5. – С. 465 – 501.
4. Jianjia Pan. Edge Detection Combining Wavelet Transform and Canny Operator Based on Fusion Rules / Pan Jianjia // International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Baoding. – 2009. – Pp. 324 – 328.
5. Щапов П. Ф. Синтез информационной модели процедуры альтернативной функциональной диагностики / П. Ф. Щапов, Р. П. Мигуценко // Приборы и методы измерений. – Минск. – 2014. – Вып. 2. – С. 94 – 100.
6. Мигуценко Р. П. Експериментальна перевірка моделі оптимізації простору діагностичних параметрів при вейвлет-перетвореннях вібросигналів дизельних агрегатів / Р. П. Мигуценко // Вісник Національного транспортного університету. – Київ. – 2013. – №28. – С. 343 – 350.
7. Шитов А. Б. Разработка численных методов и программ, связанных с применением вейвлет-анализа для моделирования и обработки экспериментальных данных: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / А. Б. Шитов. – Иваново, 2001. – 124 с.
8. Мигуценко Р.П. Структурно-алгоритмічна оптимізація систем вібродіагностики за критерієм мінімуму імовірності помилки / Р.П. Мигуценко // Метрологія і прилади. – 2014. – №1. – С. 168 – 171.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

РЕАЛІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕДУР СИСТЕМОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВІБРОСИГНАЛІВ ЗАСОБАМИ LABVIEW

І.М. Коржов, О.Ю. Кропачек

У статті розглянута комп'ютеризована реалізація процедури альтернативної діагностики стану складних промислових вібраційних об'єктів. Представлена реалізація отримання тестових V - і W -статистик, що відображають енергетичну складову сигналу і швидкість зміни цієї складової відповідно. Розроблено та досліджено алгоритми отримання коефіцієнта $R_{\xi\eta}$ взаємної спектральної нестационарності як критерію діагностики складних промислових вібраційних об'єктів.

Ключові слова: вібросигнал, діагностика промислових об'єктів, тестова статистика, обчислювальна процедура, LabView.

IMPLEMENTATION OF COMPUTING PROCEDURES OF SYSTEM INFORMATIONAL TRANSFORMATION OF NON-STATIONARY VIBRO SIGNALS WITH LABVIEW MEANS

I.M. Korzhov, O.Yu. Kropachok

The article considers the computerized implementation of the procedure for alternative diagnostics of complex industrial vibration objects. The implementation of obtaining test V and W statistics reflecting the energy component of the signal and the rate of change of this component, respectively, is presented. The algorithms for obtaining the coefficient $R_{\xi\eta}$ of mutual spectral nonstationarity as a criterion for diagnosing complex industrial vibration objects have been developed and investigated.

Keywords: vibration signal, diagnostics of industrial objects, test statistics, computational procedure, LabView.

УДК 519

О.О. Морозов

Національна академія Національної гвардії України, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ ОПЕРАЦІЙ, ЩО ЗДІЙСНЮЮТЬСЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ

У статті розглядається задача визначення параметрів контролю операцій, що здійснюються складними системами. В якості таких параметрів розглядаються точність оцінювання обсягу здійснюваної операції (або точність контролю) та швидкість її здійснення. Отримані вирази, що встановлюють залежність відносної точності виміру швидкості здійснення операції від часу контролю. Організація контролю за такими параметрами дозволить своєчасно здійснювати управляючі впливи на систему задля досягнення цілі операції.

Ключові слова: складна система, контроль здійснення операції, параметри контролю, точність контролю, орган управління, досягнення цілі операції

Постановка проблеми

Функціонування складних систем (СС) спрямовано на виконання певних операцій (обслуговування, забезпечення, виробництво, досягнення переваги тощо), закінчення яких визначається досягненням певної цілі. Для здійснення операцій виділяються ресурси (часові, матеріальні, людські тощо). Управління такими системами вимагає контролю за процесом досягнення цілі. Такий контроль необхідний для поточного оцінювання спроможності СС досягти визначеної цілі у встановлений термін при заданих ресурсах та прийняття у разі необхідності рішення щодо корегування цілі або часу та/або ресурсів. Оцінку поточного стану складної системи та вироблення необхідних управлінських рішень повинен здійснювати орган управління системою (далі – орган управління (ОУ)).

Такий орган визначає завдання системі досягти до заданого моменту часу певного значення якогонебудь показника операції (наприклад, виконати необхідний обсяг робіт (план)), після цього система починає рухатися до цілі по певній траєкторії. Якщо за результатами контролю з'ясується, що досягти цілі неможливим, то необхідно виявити це якомога раніше і так змінювати параметри цілі, щоб вона стала досяжною. Ця зміна може виражатися в зменшенні кількісної оцінки планованого результату, у збільшенні часу на його досягнення, або в тім і іншому одночасно. Завданням контролю повинна бути оцінка поточного стану складної системи, обсягу виконаних робіт, ризику невиконання плану, а також близькості її стану до критичної області, звідки досягнення цілі буде неможливо при будь-яких припустимих витратах. Тобто ОУ системою повинен виконувати і контролюючі функції, і функції перепланування. Проблема полягає в тім, як визначити параметри контролю або інтенсивність контролю. Організація контролю

повинна задовольняти двом суперечливим вимогам: з одного боку, точок контролю повинне бути досить багато, тому що при відсутності належного контролю можна потрапити в ситуацію, коли що-небудь міняти вже пізно. З іншого боку, за проведення контролю доводиться "платити", тому точок контролю повинне бути якнайменше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вирішенню задачі організації контролю операцій, що здійснюються складними системами присвячено достатньо робіт [1-3]. В багатьох джерелах задача організації контролю та управління в таких системах розглядається як задачі програмного-цільового планування – коли, скільки і які ресурси необхідно виділяти (використовувати) аби система виконала поставлені завдання у встановлені терміни. При цьому, як правило, приймається, що стан системи контрольований, завдання (операція) виконуються без порушення встановлених регламентів (механізмів) її функціонування [4, 5]. У роботі [6] розглядається схожа задача та спосіб її рішення, що дозволяє знайти моменти часу, коли необхідно проводити контроль стану системи.

Але досвід управління складними системами, особливо систем критичного функціонування, показує, що визначення тільки моментів часу контролю недостатньо. Для таких систем контроль повинен бути не разовою операцією, а безперервною, і в кожен момент часу потрібно приймати рішення про параметри контролю на поточний момент часу - для кожного моменту часу треба визначати необхідну точність оцінювання обсягу здійснюваної операції (або точність контролю) та швидкість її здійснення. Якщо формалізувати та вирішити задачу за таких вимог та у такій постановці, то це дасть можливість для будь-якого моменту часу визначати поточні

складності досягнення цілі, а також ступінь ризику недосягнення запланованої цілі операції.

Мета статті – розроблення алгоритму визначення параметрів контролю операцій, що здійснюються складними системами, який би забезпечував безперервне та адаптивне управління такими системами.

Виклад основного матеріалу

Допустимо, що за час $t_{пл}$ необхідно досягти результату операції, кількісне значення якої є $Q_{пл}$. При цьому відомо, що існує мінімальна швидкість досягнення результату в часі v_{min} та максимальна швидкість v_{max} (рис. 1).

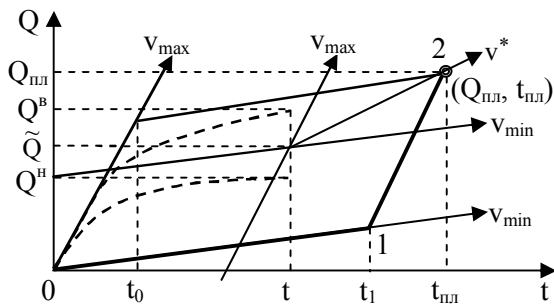


Рис. 1. Графічне представлення протікання операції

Необхідно знайти точки контролю за станом здійснюваної операції, які можуть бути моментами часу, коли необхідно прийняти рішення про управляючий вплив або перегляд параметрів цілі. Якщо в процесі руху СС попадає в область, що лежить нижче прямої 1-2 (див. рис. 1), то досягнення цілі операції в заданий час $t_{пл}$ стане неможливим. Тобто ця область стає критичною, і наближення до неї треба розглядати як загрозу невиконання завдання системою, що здійснює операцію. Отже, контроль за протіканням операції повинен бути організований таким чином, щоб можна було вчасно втрутитися в хід її здійснення, якщо її результат наближається до критичної зони.

Нехай $\tilde{v}(t)$ – оцінювана миттєва швидкість руху СС до цілі в момент t , $\tilde{v}(t) \in [v_{min}, v_{max}]$. Нехай вона відома з деякою точністю $\Delta v(t)$:

$$\begin{cases} v^B(t) = \tilde{v}(t) + \Delta v(t)/2, \\ v^H(t) = \tilde{v}(t) - \Delta v(t)/2, \end{cases} \quad (1)$$

де $v^B(t)$ і $v^H(t)$ – відповідно, верхня та нижня оцінки швидкості в момент t , $v^B(t), v^H(t) \in [v_{min}, v_{max}]$, причому

$$\Delta v(t) = (v_{max} - v_{min}) \cdot \delta(t), \quad (2)$$

$\delta(t)$ – відносна точність виміру швидкості, $\delta(t) \in [0, 1]$.

Саме цю величину і будемо вважати точністю контролю, і задача буде полягати в знаходженні цієї величини як функції часу t . Для будь-якого моменту t можна оцінити поточні "складності" (ризик не досягнення цілі) у такий спосіб:

$$d(t) = \frac{v^*(t) - v_{min}}{v_{max} - v_{min}}, \quad v^*(t) = \frac{Q_{пл} - Q(t)}{t_{пл} - t}, \quad (3)$$

де $d(t)$ – складність досягнення цілі в момент t ; $v^*(t)$ – мінімальна постійна швидкість, з якою необхідно рухатися з поточної точки $(t, Q(t))$, щоб виконати плановий обсяг операції у встановлений термін $t_{пл}$ (рис. 1).

Таким чином, за ймовірність досягнення цілі операції для поточної точки прийемо відношення довжини відрізка можливих швидкостей до довжини відрізка прийнятних швидкостей (рухаючись із якими постійно, можна здійснити операцію не пізніше відведеного терміну). Тоді

$$\tilde{Q}(t) = \int_0^t \tilde{v}(\tau) d\tau,$$

$$Q^B(t) = \int_0^t v^B(\tau) d\tau = \int_0^t \left(\tilde{v}(\tau) + \frac{v_{max} - v_{min}}{2} \delta(\tau) \right) d\tau, \quad (4)$$

$$Q^H(t) = \int_0^t v^H(\tau) d\tau = \int_0^t \left(\tilde{v}(\tau) - \frac{v_{max} - v_{min}}{2} \delta(\tau) \right) d\tau,$$

де $\tilde{Q}(t)$, $Q^B(t)$, $Q^H(t)$ – оцінки здійсненого обсягу операції до моменту t , розраховані по $\tilde{v}(t)$, $v^B(t)$ і $v^H(t)$ відповідно.

Найбільш цікавим є гірший випадок, тобто $Q^H(t)$. Для точки $(t, Q^H(t))$ можна знайти відповідну мінімальну постійну швидкість, необхідну для досягнення цілі:

$$\begin{aligned} v^{H*}(t) &= (Q_{пл} - Q^H(t)) / (t_{пл} - t) = \\ &= Q_{пл} - \tilde{Q}(t) + \frac{v_{max} - v_{min}}{2} \int_0^t \delta(\tau) d\tau / (t_{пл} - t). \end{aligned} \quad (5)$$

Для будь-якого моменту t будемо задавати необхідну точність виміру швидкості в такий спосіб:

$$\delta(t) = 1 - d(t). \quad (6)$$

Сенс виразу (6) в тім, що чим більше ризик недосягнення цілі в поточний момент часу, тим більше необхідно витратити зусиль на контроль за здійсненням операції, тому що результат цієї операції наближається до критичної межі, вийшовши за яку, система вже не зможе здійснити визначений обсяг операції за час $t_{пл}$. Тому бажано в таких випадках знати стан контрольованого ходу здійснення операції з можливо більшою точністю, щоб, наприклад,

втрутитися в цей процес, скорегувати завдання і т.п., якщо величина ризику (складності досягнення цілі) перевищить деяку задану величину. У той же час, якщо результат здійснення операції оцінюється як цілком благополучний (тобто ризик невиконання операції невеликий), то не треба витратити зайві ресурси на контроль та перевірку ходу виконання завдання. Слід відмітити, що це лише один з можливих варіантів вибору точності виміру $\delta(t)$ залежно від складностей $d(t)$. У загальному випадку формулу (6) можна записати так: $\delta(t) = \psi(d(t))$, де $\psi(x) \in [0, 1]$ при $x \in [0, 1]$ та $\psi(0) = 1$, $\psi(1) = 0$.

Розглянемо приклад, що ілюструє вищевикладене. Допустимо, у якийсь момент орган управління СС бажає довідатися про поточний обсяг здійснюваної системою операції. Нехай органу управління вже відомий деякий інтервал, у якому перебуває поточний обсяг операції $[Q^H(t), Q^B(t)]$, який можна розрахувати виходячи з даних контролю за попередні інтервали часу функціонування системи. Щоб оцінити поточну швидкість виконання операції $\tilde{v}(t)$, орган управління повинен отримати відомості від виконавчих елементів складної системи щодо здійсненого обсягу операції за поточний інтервал часу. Витрати на одержання такої інформації близькі до нуля, але і її точність також невелика. Щоб підвищити точність, можна зажадати від одного або декількох виконавчих елементів СС надати більш повні відомості, але при цьому прийдеться понести певні витрати на їх підготовку, аналіз і перевірку. Однак, мабуть, таку перевірку прийдеться проводити, якщо з'ясується, що ризик невиконання операції у встановлений термін досить значний.

Повернемося до знаходження необхідної точності виміру швидкості руху до цілі. Підставивши у вираз (6) формули (3) і (5), одержимо інтегральне рівняння для $\delta(t)$:

$$\delta(t) = 1 - (v_{\max} - v_{\min})^{-1} \times \frac{Q_{\text{пл}} - \tilde{Q}(t) + \frac{v_{\max} - v_{\min}}{2} \int_0^t \delta(\tau) d\tau}{t_{\text{пл}} - t} - v_{\min} \quad (7)$$

Продиференціюємо по t , а також враховуючи, що похідна $\tilde{Q}'(t) = \tilde{v}(t)$, одержимо лінійне диференціальне рівняння:

$$\delta'(t) = \frac{1}{t_{\text{пл}} - t} \left(\frac{\delta(t)}{2} - \frac{v_{\max} - \tilde{v}(t)}{v_{\max} - v_{\min}} \right) \quad (8)$$

з початковою умовою:

$$\delta(0) = 1 - d(0) = \frac{v_{\max} - Q_{\text{пл}}/t_{\text{пл}}}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (9)$$

Вирішуючи це рівняння, одержимо:

$$\delta(t) = \frac{\sqrt{t_{\text{пл}}} \left(v_{\max} - \frac{Q_{\text{пл}}}{t_{\text{пл}}} \right) - \int_0^t \frac{(v_{\max} - \tilde{v}(\tau))}{\sqrt{t_{\text{пл}} - \tau}} d\tau}{\sqrt{t_{\text{пл}} - t} (v_{\max} - v_{\min})} \quad (10)$$

Відмітимо, що якщо в якийсь момент часу t_0 виявиться, що $\delta(t_0) = 1$, то це означає, що подальший контроль не потрібний, оскільки $d(t_0) = 0$, і система досягне цілі операції у запланований термін, навіть рухаючись із мінімальною швидкістю. Якщо ж у момент t_1 буде виконано $\delta(t_1) < 0$, то система могла до цього моменту ввійти в критичну зону, і досягнення цілі може виявитися неможливим.

Розглянемо окремий випадок, коли оцінювана швидкість руху постійна і дорівнює середній: $\tilde{v}(t) = (v_{\max} + v_{\min})/2$. Тоді

$$\delta(t) = 1 - \sqrt{\frac{t_{\text{пл}}}{t_{\text{пл}} - t}} \left(\frac{Q_{\text{пл}}/t_{\text{пл}} - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \right) \quad (11)$$

Знайдемо для цього випадку величини t_0 і t_1 . Підставляючи $\delta(t_0) = 1$ в (11), отримаємо, що

$$\sqrt{\frac{t_{\text{пл}}}{t_{\text{пл}} - t}} \left(\frac{Q_{\text{пл}}/t_{\text{пл}} - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \right) = 0, \text{ тобто, якщо задача}$$

не тривіальна і досягнення цілі за час $t_{\text{пл}}$ неможливе навіть при постійному русі з мінімальною швидкістю, то контроль припиняти не можна. При $\delta(t_1) = 0$ одержуємо

$$t_1 = t_{\text{пл}} \left(1 - \left(\frac{Q_{\text{пл}}/t_{\text{пл}} - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \right)^2 \right) \quad (12)$$

Існує альтернативний підхід до обчислення кількісної оцінки складності досягнення цілі. Якщо $\mu \in (0, 1]$ - безрозмірна оцінка якості деякого ресурсу (чим більше, тим краще), а $\varepsilon \in (0, 1]$ - нижня границя вимог до якості ресурсу, то складності можна задати так [7]:

$$d = \varepsilon(1 - \mu) / (\mu(1 - \varepsilon)), \quad (13)$$

при цьому $d \in [0, 1]$ при виконанні умови $\mu \geq \varepsilon$, тобто якщо ресурс є припустимим. Слід відмітити, що у формулі (3) не враховано ще одну особливість розглянутої задачі. З області, що лежить нижче прямої 0-1 на рис. 1, теоретично можливо досягти цілі операції у запланований термін. Проте, мінімальна швидкість досягнення результату операції може розумітися як оцінка надійності системи, рух із ще меншою швидкістю може відбуватися у випадку виникнення малоймовірних надзвичайних обставин, які можуть привести до руйнування самої системи. Саме тому кількісна оцінка ризику повинна зростати також і при наближенні системи до відрізка 0-1. Тоді для розглянутої задачі з урахуванням вищевик-

деного зауваження складності можуть бути обчислені в такий спосіб:

$$d = \max(d_1, d_2),$$

$$\text{де } d_1 = \frac{\varepsilon_1(1 - \mu_1)}{\mu_1(1 - \varepsilon_1)} = \frac{|E_1 E_2| \cdot |E_3 P|}{|E_1 P| \cdot |E_2 E_3|},$$

$$d_2 = \frac{\varepsilon_2(1 - \mu_2)}{\mu_2(1 - \varepsilon_2)} = \frac{|F_1 F_2| \cdot |F_3 P|}{|F_1 P| \cdot |F_2 F_3|},$$

що після підстановки дає таку формулу для $d(t)$:

$$d(t) = \max(d_1(t), d_2(t)),$$

$$d_1(t) = v_{\min} \cdot (v_{\max} t - Q(t)) / (v_{\max} - v_{\min}) \times$$

$$\times \frac{(Q_{\text{пл}} - v_{\min} t_{\text{пл}} - t(v_{\max} - v_{\min}))}{Q(t)(Q_{\text{пл}} - v_{\min} t_{\text{пл}} + Q(t) - v_{\max} t)}; \quad (14)$$

$$d_2(t) = (v_{\max} t - Q(t)) / (v_{\max} - v_{\min}) \times$$

$$\times \frac{(Q(t) - Q_{\text{пл}} - v_{\min} t_{\text{пл}} + v_{\min} t)}{(t_{\text{пл}} - t)(v_{\max} t_{\text{пл}} - Q_{\text{пл}})}.$$

Підставляючи в (14) замість $Q(t)$ величину $Q^H(t)$ з (4), з урахуванням (6) і умови $\tilde{Q}'(t) = \tilde{v}(t)$, можна одержати диференціальне рівняння для даного виду оцінки складності. З огляду громіздкості конструкцій, що виходять, у статті вони не наводяться.

Висновки

1. Розроблений алгоритму визначення параметрів контролю операцій, що здійснюються складними системами, реалізація якого забезпечить адаптивне управління складними системами.

2. Отримані вирази, що встановлюють залежність відносної точності виміру швидкості здійснення операції від часу контролю. Організація контролю за

такими параметрами дозволить своєчасно здійснювати управляючі впливи на систему задля досягнення цілі операції.

3. Як можливе розширення даної задачі в її постановку можна ввести управління і розглядати два варіанти задачі оптимального управління - з кінцевим числом точок контролю стану системи і з безперервним контролем, де як кінцевий результат буде розглядатися мінімізація витрат на досягнення цілі у відведений час, і задача буде полягати в знаходженні оптимальної траєкторії руху системи до цілі.

Список літератури

1. Бурков В.Н. Механизмы управления в активных системах / В.Н. Бурков // Тренды и управление. – 2014. – Вып. 4(8). – С. 428-440.
2. Лафта Дж.К. Теория организации: учеб. пособие / Дж.К. Лафта. – М.: ТК Велби, Проспект, 2003. – 416 с.
3. Райченко А.В. Прикладная организация / А.В. Райченко. – СПб.: Питер, 2003. – 304 с.
4. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 103 с.
5. Сетевые модели в управлении / О.П. Кузнецова, М.В. Губко; под ред. Д.А. Новикова. – М.: Эгвес, 2011. – 443 с.
6. Морозов О.О. Алгоритм контролю та управління складними системами / О.О. Морозов, Л.В. Морозова [Текст] // Системи обробки інформації. – 2016. – Вып. 3(140). – С. 88-91.
7. Каплинский А.И. Моделирование и алгоритмизация слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем / А.И. Каплинский, И.Б. Русман, В.М. Умывакин. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. – 168 с.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.А. Подригало, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ ОПЕРАЦИЙ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫХ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

А.А. Морозов

В статье рассматривается задача определения параметров контроля операций, осуществляемых сложными системами. В качестве таких параметров рассматриваются точность оценивания объема осуществляемой операции (или точность контроля) и скорость ее осуществления. Полученные выражения, устанавливающие зависимость относительной точности измерения скорости осуществления операции, от времени контроля. Организация контроля по таким параметрам позволит своевременно осуществлять управляющие влияния на систему для достижения цели операции.

Ключевые слова: сложная система, контроль осуществления операции, параметры контроля, точность контроля, орган управления, достижение цели операции

DETERMINATION OF PARAMETERS OF CONTROL OF OPERATIONS IMPLEMENTED BY COMPLEX SYSTEMS

A.A. Morozov

The article deals with the task of determining the parameters of the control of operations carried out by complex systems. As such parameters, the accuracy of estimating the volume of the operation being performed (or the accuracy of the control) and the speed of its implementation are considered. The obtained expressions, establishing the dependence of the relative accuracy of measuring the speed of the operation, on the control time. The organization of control over such parameters will allow for timely implementation of control influences on the system to achieve the whole operations.

Keywords: complex system, control of the operation, parameters of control, accuracy of control, control body, achievement of the objective of the operation

УДК 621.3.049.77:620.3

І.Ш. Невлюдов, В.О. Письменецький, А.В. Фролов, О.О. Чала, М.А. Ємельянов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КРЕМНІЄВИХ КОНЦЕНТРАТОРНИХ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕМЕНТІВ

В роботі експериментально досліджено ефективність застосування концентраторів параболоциліндричного типу з метою підвищення ККД кремнієвих фотоперетворювачів (ФП). Виконано порівняльний аналіз ефективності концентраторних кремнієвих ФП на одному р-п переході з двох та трьох перехідними ФП на основі GaAs. Показано конкурентоздатність концентраторного кремнієвого фотоперетворювача з одним р-п переходом, у порівнянні з трьохпрохідним гетерофотоперетворювачем (ККД 35 %).

Ключові слова: концентратор, сонячна батарея, параболоциліндричне дзеркало, фокус, розкритт, розфокусування, коефіцієнт віддзеркалення.

Номенклатура

ККД – коефіцієнт корисної дії;
 СЕ – сонячний елемент;
 ФП – фотоперетворювач.

Вступ

В теперішній час время 86% електричної та теплової енергії виробляється на атомних та теплових електростанціях, які працюють на вичерпних паливних ресурсах.

Робота таких електростанцій супроводжується значним хімічним забрудненням та використання скороченням природних ресурсів, а також «тепловим» забрудненням Земної кулі.

Використання атомних електростанцій пов'язано з проблемами безпеки їх експлуатації та подальшої переробки радіаційних відходів та забруднення.

Для вирішення зазначених проблем, перспективним є використання сонячної енергії, тому що цей вид енергії – невичерпний, доступний всім та, а також – екологічно чистий [1 – 3, 7 – 9].

Дослідженням фотоелектричних перетворювачів (ФП) присвячена значна кількість наукових публікацій.

Це роботи закордонних вчених Martin A. Green, Jianhua Zhao, H. Honsberg, Ж.І. Алферова, В.М. Андреева [4]; українських вчених В.Г. Літовченка, А.П. Горбаня, В.І. Стріхи.

Вартість електроенергії сонячних фотоелектростанцій у більшості випадків більше, ніж при використанні традиційних способів її отримання, через низький ККД ФП.

Метою даної роботи є дослідження ефективності використання концентраторів для збільшення ККД кремнієвих одноперехідних СЕ [5, 6, 10].

Результати досліджень

В стаціонарний параболоциліндричний сонячний модуль складається (рис. 1) з таких елементів:

1. Параболоциліндричне дзеркало-концентратор.
2. Фотоприймач концентрованого сонячного випромінювання.
3. Контрольний фотоприймач.
4. Система контролю струмів і напруг фотоприймачів.
5. Ізолююча підкладка.

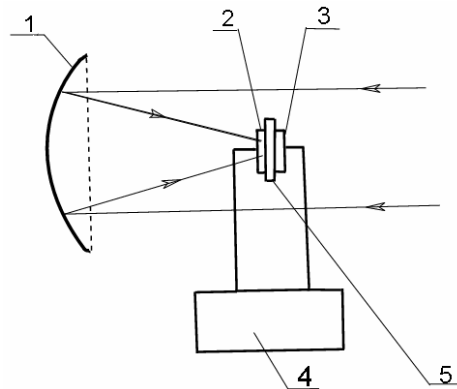


Рис. 1. Структура сонячного модулю

Конструкція параболоциліндричного відбивача-концентратора з оптоабсорбером приведена на рис. 2.

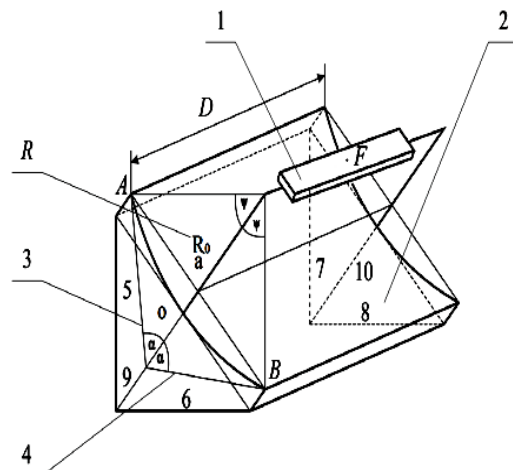


Рис. 2. Конструкції параболоциліндричного відбивача-концентратора з оптоабсорбером

Розрахунки показують, що у такій конструкції параметричний кут α складає більше 45° , що відкриває перспективи збільшення тривалості роботи концентратора.

Для підвищення механічної міцності конструкції введено ребра жорсткості 5, 6, 7, 8, а 9, 10 – напрямні елементи конструкції.

Для ідентичності умов вимірювань основний і контрольний фотоприймач розміщені на різних сторонах ізолюючої підкладки 5.

Сонячний модуль (рис. 3) містить дві напрямні за допомогою яких фіксуються положення плати з основним та контрольним фотоприймачем.

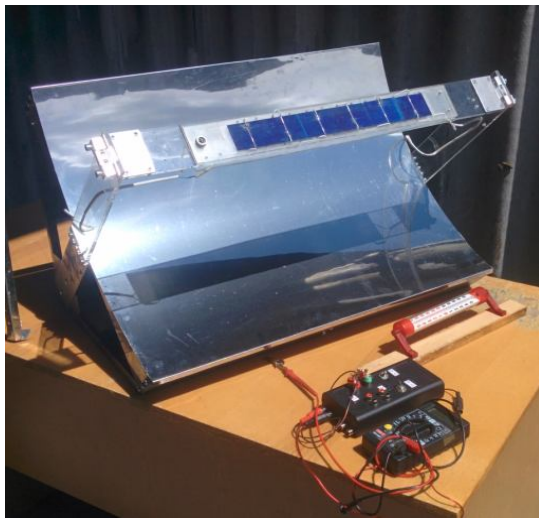


Рис. 3. Сонячний модуль

Пази з поділками у кожній напрямній та фіксуючі пристрої утворюють регулятор, що встановлює певне значення коефіцієнту концентрації C . Залежність коефіцієнту концентрації C від поло-

ження регулятора розфокусування показано на рис. 4. За допомогою регулятора змінюється відстань між фокальною лінією дзеркала та основним фотоприймачем.

При переміщенні від точки C_1 до точки C_3 коефіцієнт концентрації збільшується. Максимальне значення коефіцієнту концентрації позначено точкою C_m .

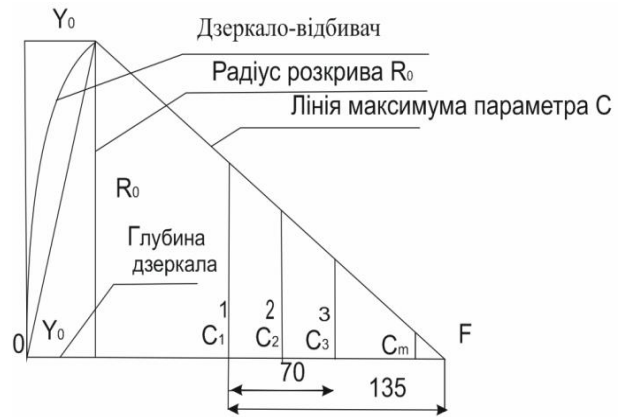


Рис. 4. Залежність коефіцієнту концентрації C від положення регулятора розфокусування

Перші випробування сонячного модуля були проведені 14 березня 2017 року при температурі навколишнього середовища 12°C та малохмарній погоді.

Було зафіксовано максимальний коефіцієнт концентрації 3,68, оскільки порівняно невисокі весняні температури забезпечили добрий тепловідвід.

Як було показано раніше, для монокремнію при температурі 25°C максимально допустимий коефіцієнт концентрації менше, або рівний 3. Дослідження були продовжені 7 серпня 2017 року. Результати вимірювань занесено до табл. 1.

Таблиця 1

Результати вимірювань параметрів U_{xx} , I_{kz} , потужності P_m та розрахунку коефіцієнта концентрації C

Тип ФП		Основний ФП				
Часовий інтервал		11.00	11.30	12.00	12.30	13.00
U_{xx} , В	1	1,15	1,16	1,17	1,13	1,07
	2	1,21	1,22	1,23	1,15	1,13
	3	1,25	1,26	1,27	1,23	1,16
I_{kz} , мА	1	54	54	55	51	49
	2	64	65	67	65	61
	3	75	78	80	73	67
P_m , мВт	1	62	62,6	64,3	57,6	52,4
	2	77	79,3	82,4	74,7	68,9
	3	94	98,3	102,8	89,8	77,7
Коефіцієнт концентрації	1	1,2	1,24	1,26	1,17	1,07
	2	1,5	1,52	1,6	1,43	1,11
	3	1,8	1,88	2,01	1,72	1,52

На рис. 5 наведено часові залежності струму короткого замикання $I_{кз}$ при різних коефіцієнтах концентрації C , а на рис. 6 – часові залежності напруги холостого ходу U_{xx} при різних коефіцієнтах концентрації C .

При побудові часових залежностей було використано такі коефіцієнти концентрації: 1,25; 1,6; 2.

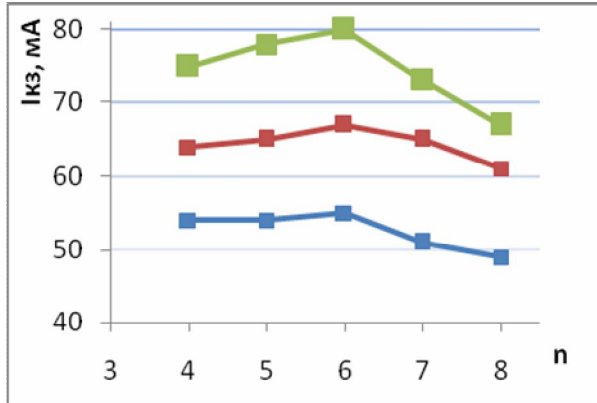


Рис. 5. Часові залежності струму короткого замикання $I_{кз}$ при різних коефіцієнтах концентрації C

На рис. 8 представлено Часові залежності коефіцієнта концентрації.

На рис. 8 представлено порівняльний аналіз концентраторних кремнієвих ФП на одному р-п переході та GaAs ФП з 1, 2, 3 р-п переходами/

Пунктиром показано значення параметру концентраторного ККД, коли $C=3$, а ККД кремнієвого СБ дорівнює 17%.

З наведеного можна зробити висновок, що концентраторний кремнієвий ККД з одним р-п переходом може конкурувати з ККД на основі GaAs з трьома р-п переходами.

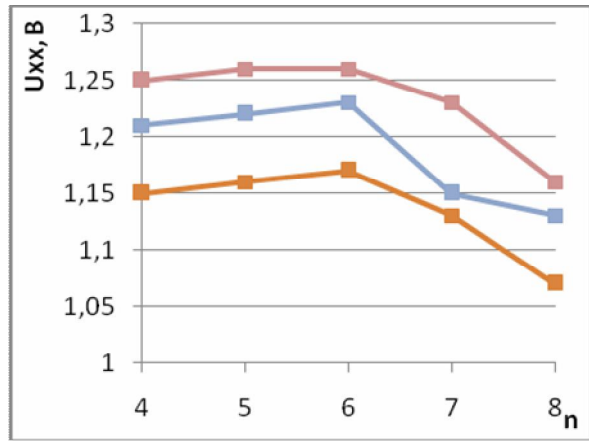
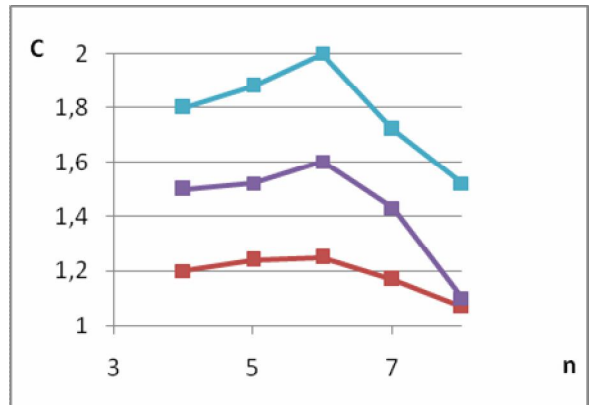


Рис. 6. Часові залежності напруги холостого ходу U_{xx} при різних коефіцієнтах концентрації C



1,2,3 – часові залежності кремнієвих ККД концентраторних ККД з параметром C 1,25; 1,6; 2,0 відповідно;
4,5,6 – ККД ФП на основі GaAs з одним р-п переходом, двома та трьома р-п переходами з використанням потрібних з'єднань відповідно

Рис. 7. Часові залежності коефіцієнта концентрації

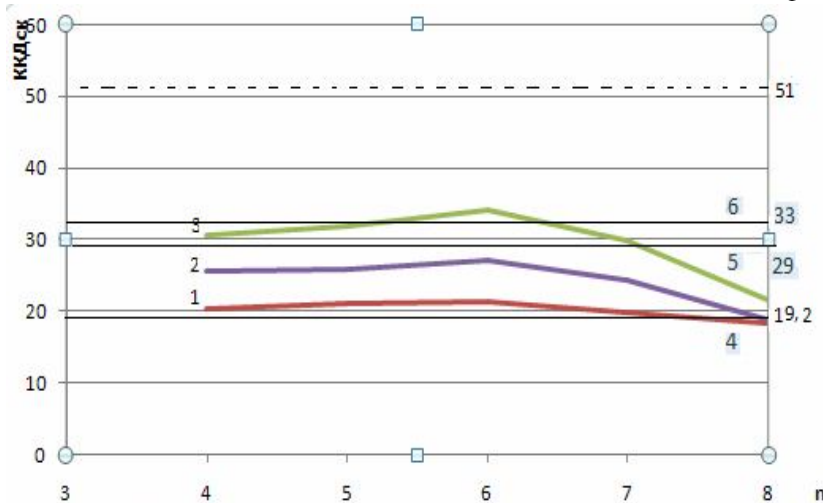
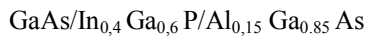


Рис. 8. Порівняльний аналіз концентраторних кремнієвих ФП на одному р-п переході та GaAs ФП з 1, 2, 3 р-п переходами

Зазначені часові залежності ККДсб. для трьох значень параметра C (1,25 1,6 2) позначені цифрами

1, 2, 3. Горизонтальними лініями 4, 5, 6 позначено значення ККД_{ФП} на основі GaAs.

Цифра відповідає одноперехідним ФП типу Ge/ GaAs з ККД=19%, цифрою 5 – двохперехідним ФП с потрійними з'єднаннями



з ККД=29%, цифра 6 – трьох перехідним ФП GaInP/GaInAs/Ge ККД 33%.

Для виготовлення одно- та двохперехідних ФП на основі GaAs використовувалася технологія рідиннофазової епітаксії, а для трьох перехідних – технологія МОС гідридної епітаксії.

Відзначимо, що в таких структурах існує технологічна проблема суміщення кристалічних градок матеріалів різного складу, що ускладнюється при збільшенні кількості р-п переходів.

З наведених графіків можна зробити висновок, що при значенні параметра $C=2$ одноперехідний кремнієвий ФП конкурує з трьохперехідним GaAs ФП.

Більш того, при $C=3$, що для кремнію, з урахуванням теплового режиму, можливо реалізувати ККД $17 \cdot 3 = 51\%$ (пунктирна лінія на рис. 7).

ВИСНОВКИ

1. Отримано ККД концентратора сонячного модуля 34% при ККД кристалу фотоперетворювача 17% з одним р-п переходом, що підтверджує ефективність використання параболоциліндричного концентратора.

2. Показано конкурентоздатність концентратора кремнієвого фотоперетворювача з одним р-п переходом, у порівнянні з трьохперехідним гетерофотоперетворювачем (ккд 35 %).

3. З урахуванням реалізованого коефіцієнта концентрації при весняних випробуваннях макету досягнуто загальний ККД 51 %.

4. Доцільне продовження досліджень для оцінки ефективності параболоциліндричного концент-

тора в умовах суцільного хмарного покрову, а також при спільній роботі з сонячними колекторами.

Список літератури

1. А да Роза. *Возобновляемые источники энергии физико -технические основы пер. с англ. М. изд. дом. МЭИ; 2010. – 704 с.*
2. *Солнечная тепловая станция украинского изобретателя вырабатывает энергию дешевле, чем при сжигании газа chearsol@ukr.net.*
3. С.М. Воронин, Н.С. Овсянников. *Пути повышения конкурентоспособности солнечных фотозлектро-станций. Научный журнал КубГАУ, №76 (02), 2012г.*
4. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев *Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики. ФТП, т. 38 вып.8, 2004г. с. 937 – 948*
5. Н.П. Искрянников, К.Н. Свиридов, В.И. Шадрин *Автономные солнечные установки с концентраторами солнечного излучения. Журн. Интеграл. – 2003г., № 2. – с.121 – 138.*
6. Д.С. Стребков. *Концентраторы солнечного излучения. М.: ГНУВ и ЭСХ. 2007. – 316с.*
7. С.М. Воронин, А.А. Таран *Параметры автономной системы электроснабжения на основе солнечной электростанции. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007г. №3. с. 24 – 25.*
8. Adam Hilger, *Bristol and Philadelphia, pp. 382, fig. 11.18.*
9. Слипченко Н.И. *Письменецкий В.А. Фролов А.В. Прогнозные оценки надежности монокристаллических кремниевых фотопреобразователей электронная компонентная база состояние и перспективы развития. Сб. науч. трудов II Межд. конф. Харьков – Кацивели, 2009. с. 194 – 197.*
10. Слипченко Н.М., Письменецкий В.А., Глушко Е.С., Борцов В.И., *Применение фокальных концентраторов для повышения эффективности работы кремниевых преобразователей. Сб. науч. тр. 5 межд. конф. «Функциональная база нанoeлектроники», Харьков - Крым, 2012., с 325- 328.*

Надійшла до редколегії 30.10.2017.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Палагін, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

И.Ш. Невлюдов, В.А. Письменецкий, А.В. Фролов, Е.А. Чала, Н.А. Емельянов

В работе экспериментально исследована эффективность применения концентраторов параболоцилиндрического типа с целью повышения КПД кремниевых фотопреобразователей (ФП). Выполнен сравнительный анализ эффективности концентраторных кремниевых ФП на одном р-п переходе с двух и трех переходными ФП на основе GaAs. Показана конкурентоспособность концентраторного кремниевоего фотопреобразователя с одним р-п переходом, по сравнению с трехпереходным гетероФП (КПД 35%).

Ключевые слова: концентратор, солнечная батарея, параболоцилиндрическое зеркало, фокус, разрыв, расфокусирование, коэффициент отражения.

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF USE OF SILICON CONCENTRATE SOLAR PHOTOELEMENTS

I.Sh. Nevliudov, V.O. Pysmenetskyi, A.V. Frolov, O.O. Chala, M.A. Yemelianov

The efficiency of application of parabolic-cylindrical type concentrators with the purpose of increasing the efficiency of silicon photoconverters (FC) is experimentally investigated. A comparative analysis of the effectiveness of concentrator silicon phase transitions on one p-n junction with two and three transition GaAs-based phase transition has been performed. The competitiveness of a concentrator silicon photoconvertor with a single p-n junction is shown, in comparison with triaxial p-n junction heteroFC (35% efficiency).

Keywords: concentrator, solar battery, parabolic-cylindrical mirror, focus, rupture, time-focusing, reflection coefficient.

УДК 681.5.015 (045)

М.Я. Островерхов¹, А. М. Сільвестров¹, Г.І. Кривобока²¹ Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ² Вінницький коледж Національного університету харчових технологій, Вінниця

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ КАБЕЛІВ

Завдяки можливостям сучасних інформаційних систем показано шляхи удосконалення систем параметричної ідентифікації, а саме, отримання більш точних (ніж загально прийнятим методом найменших квадратів) оцінок параметрів математичної моделі досліджуваного об'єкта з обмежених у часі і діапазоні, зашумлених вибірок даних про змінні стану і керуючі впливи. Розглянутий метод ідентифікації запропоновано використовувати в адаптивних системах керування окремими технологічними процесами у виробництві кабелів.

Ключові слова: параметрична ідентифікація, МНК-оцінювання, незміщеність, ефективність оцінок, модифікація МНК.

Вступ

Виробництво електричних кабелів здійснюється на електротехнічних комплексах, які складаються з десятків взаємозв'язаних через рухому кабельну продукцію локальних систем в умовах дії багатьох невідомих збуджуючих факторів [1-3]. Нанесення поліетиленової ізоляції на струмопровідну жилу, яка рухається зі швидкістю 50 м/хв здійснюється блоком з трьох екструдерів. Зовнішній діаметр кожного шару ізоляції вимірюється з випадковими шумами блоком рентген-датчиків на відстані 0,5 м від виходу екструдерів. Це створює в контурах регулювання товщини ізоляції запізнення t_3 , яке негативно впливає на точність керування товщиною шарів та може призвести до втрати стійкості системи [4]. Товщина ізоляції регулюється електроприводами екструдерів шляхом зміни швидкості обертання черв'яків [5]. Вимірювання шви-

дкостей черв'яків та діаметрів шарів ізоляції проходить в умовах зашумленості корисних сигналів, що також обумовлює зменшення точності та швидкодії регулювання [4]. Підвищення якості керування за наявності шумів вимірювання на основі концепції цілеспрямованої ідентифікації [6] є актуальною науковою задачею і для даної системи сприяє зменшенню радіального та осевого зміщення ізоляції відносно металічної жили в процесі її багат шарового нанесення.

Схему системи регулювання товщини шарів ізоляції представлено на рис. 1, де X_3 , $X(t)$, $X(t - t_3)$, $\hat{X}(t)$ – вектор-функції заданих, дійсних, вимірних та прогнозованих діаметрів; $\Delta X(t)$, $U(t)$, $\omega(t)$ – вектор-функції похибок регулювання діаметрів, керуючих впливів та швидкостей обертання черв'яків трьох екструдерів; $N_1(t)$, $N_2(t)$ – вектор-функції шумів вимірювання; $\beta(t)$ – вектор-функція ідентифікованих параметрів моделі зв'язку $\omega(t)$ і $X(t)$.

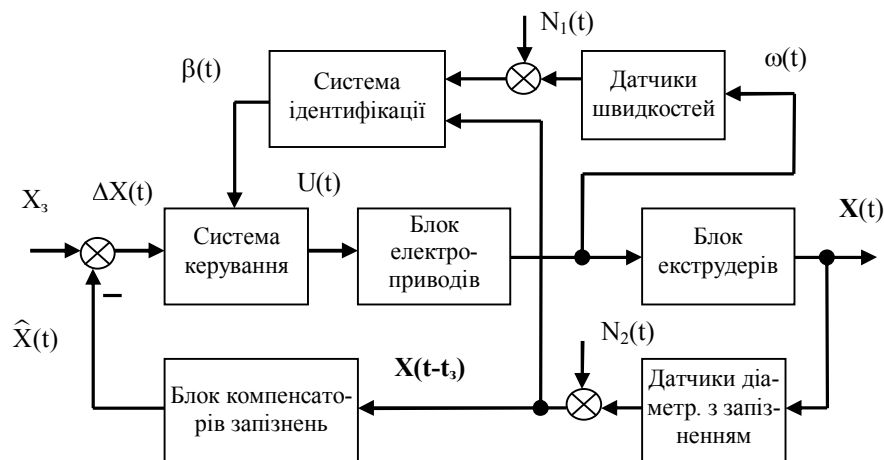


Рис. 1. Функціональна схема системи стабілізації товщини ізоляції

За минуле століття відбувся суттєвий розвиток методів і засобів ідентифікації від простих наближених ручних [7] до більш складних і точних [8], які

використовують сучасні автоматизовані системи збору і обробки даних (АСОД) з використанням потужних ЕОМ і інтелектуальних первинних перетво-

ривачів (датчиків). Це дозволило значно підвищити частоту опитування датчиків, швидкість і точність обробки інформації, збільшити інформативність даних на обмежених у часі вибірках. Однак, природні властивості реальних об'єктів (не автономність, не стаціонарність, не лінійність взаємозв'язків змінних стану, нескінченно мірність і т. ін.) не дають можливості будувати моделі, ідентичні реальному об'єкту. Найдосконаліша АСОД має можливість спостерігати тільки за обмеженою множиною змінних стану $X(t)$ об'єкта. Будь-яка модель лише наближено відображає взаємозв'язок компонентів $x_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, n -мірної вектор функції $X(t)$, та m -мірною вектор-функції $U(t)$ вхідних впливів:

$$\dot{X}^*(t) = f\left(X^*(t), U^*(t), t\right), \quad (1)$$

де $\dot{X}^*(t)$ – вектор швидкості зміни $X^*(t)$.

За обмежених відхилень ΔX^* , ΔU^* від базового режиму (X_0, U_0) та наявності природної гладкості відображення f , модель (1) можна подати з похибкою $\varepsilon^*(t)$ лінійною стаціонарною:

$$\Delta \dot{X}^*(t) = A_0 X^*(t) + B_0 U^*(t) + \varepsilon^*(t), \quad (2)$$

або її скалярним представленням ($i = \overline{1, n}$):

$$\Delta \dot{x}_i^*(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \Delta x_j^*(t) + \sum_{k=1}^m b_{ik} \Delta U_k^*(t) + \varepsilon_i^*(t), \quad (3)$$

Задача параметричної ідентифікації полягає у визначенні оцінок \hat{a}_{ij} , \hat{b}_{ik} коефіцієнтів a_{ij} , b_{ik} за умови мінімуму функціоналу I_i похибки $\varepsilon_i^*(t)$. Логічно в якості I_i взяти середній на інтервалі T спостереження квадрат похибки $\varepsilon_i^*(t)$, де в (1), (2), (3) фігурують точні значення відповідних змінних. Тоді в якості найкращої моделі (2) і, відповідно, оцінок \hat{A} , \hat{B} буде та, коефіцієнти a_{ij} , b_{ik} якої обчислено по МНК для точних даних $\dot{X}^*(t)$, $X^*(t)$, $U^*(t)$. Якщо є можливість безпосередньо вимірювати чи обчислювати $\dot{X}^*(t)$, то формально динамічні моделі (2), (3) можна подати як регресійні. Так i -й рядок системи (2) подамо у вигляді:

$$y_i^*(k) = \sum_{i=1}^{n+m} \beta_i x_i^*(k) + \varepsilon_i^*(k), \quad (4)$$

де $y_i^*(k) = \Delta \dot{x}_i^*(k)$, $x_i^*(k)$ включає множину $\Delta x_j^*(k)$, $\Delta U_k^*(k)$, β_i включає a_{ij} , b_{ik} в рівнянні (3), k – номер дискети t_k часу t , $k = \overline{1, m}$.

Таким чином, теоретично найкращою оцінкою вектора β параметрів a_{ij} , b_{ik} буде МНК – оцінка [9] за умови точного вимірювання змінних:

$$\hat{\beta}^* = \left((X^*)^T X^* \right)^{-1} (X^*)^T Y^*. \quad (5)$$

Завдання полягає в побудові такого методу параметричної ідентифікації, який би в реальних умовах зашумленості вимірів змінних $X^*(t)$, $Y^*(t)$ об'єкта давав оцінку $\hat{\beta}$, близьку до МНК – оцінки (5) для точних даних.

Зміщення і регуляризація МНК – оцінок в реальних умовах

На практиці МНК – оцінку доводиться отримувати за вимірами, збуреними випадковими перешкодами N_x і N_y :

$$X = X^* + N_x; \quad Y = Y^* + N_y. \quad (6)$$

МНК – оцінка (5) $\hat{\beta}^*$ вектора β^* для реальних даних (6):

$$\hat{\beta} = (X^T X) X^T Y = C Y, \quad C = (X^T X) X^T. \quad (7)$$

Покладемо, що перешкоди N_x і N_y — гаусівські білі взаємнокоректовані шуми і розрахуємо зсув $\Delta \beta$ оцінки (7) відносно точного значення (5):

$$\begin{aligned} \Delta \beta &= M\{\hat{\beta}\} - \beta^* = M\left\{ \left[C^* + \delta C(N) \right] \left[Y^* + \varepsilon^* + N_y \right] \right\} - \\ &= M\left\{ \left[C^* + \delta C(N) \right] Y^* \right\} - \beta^* = \\ &= \left[X^{*T} X^* + M\{N_x^T N_x\} \right]^{-1} X^{*T} Y^* - \beta^* = \\ &= \left[X^{*T} X^* + \text{diag} \sigma_i^2 M \right]^{-1} X^{*T} Y^* - \beta^*. \end{aligned} \quad (8)$$

Введемо позначення:

$$X^{*T} X^* = A^*, \quad M\{N_x^T N_x\} = \delta A,$$

$$X^{*T} Y^* = B^* = M\{X^T Y\} = B.$$

$$\text{Тоді } (A^*)^{-1} B^* = \hat{\beta}^*, \quad [A^* + \delta A] \hat{\beta} = B^*.$$

$$\text{Звідси } \delta A \hat{\beta} = -A^* (\hat{\beta} - \hat{\beta}^*) = -A^* \Delta \hat{\beta},$$

тобто $\delta A (\hat{\beta}^* + \Delta \hat{\beta}) = -A^* \Delta \hat{\beta}$, або

$$\Delta \hat{\beta} = - (A^* + \delta A)^{-1} \delta A \hat{\beta}^*. \quad (9)$$

Оцінку (7) $\hat{\beta}$ занижено відносно істинної β^* на величину (9). За умови, що норма $\|\delta A\| \rightarrow 0$, $\hat{\beta}$ прямує до β^* , $\Delta \hat{\beta} \rightarrow 0$; за умови $\|\delta A\| \rightarrow \infty$ оцінка $\hat{\beta}$ прямує до нуля, а $\Delta \hat{\beta}$ до $-\beta^*$. Коваріація оцінки (7) за наведених вище умов та приймаючи, що норма $\|N_x^T \varepsilon\|$ набагато менша, ніж $\|X^{*T}\|$ або $\|N_x^T Y^*\|$, наближено дорівнює [8]:

$$\begin{aligned} \text{cov}[\hat{\beta}] &\equiv M\{[C_1\varepsilon + C_2N_X][C_1\varepsilon + C_2N_X]^T\} = \\ &= C_1M\{\varepsilon\varepsilon^T\}C_1^T + C_2M\{N_XN_X^T\}C_2^T, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\varepsilon = \varepsilon^* + N_Y$,

$$C_1 = [X^{*T}X^* + M\{N_XN_X^T\}]^{-1}X^{*T},$$

$$C_2 = [X^{*T}X^* + M\{N_XN_X^T\}]^{-1}Y^{*T}.$$

Перша складова виразу (10) зі зростанням N_X зменшується, в другій C_2 зменшується, а $M\{N_XN_X^T\}$ збільшується. Але C_2 входить до виразу (10) квадратично, тоді як $M\{N_XN_X^T\}$ – лінійно. Тому для білого шуму, якщо $M\{N_XN_X^T\} = \sigma_{N_X}^2 \cdot m$, зі зростанням $\sigma_{N_X}^2$ коваріація оцінки $\hat{\beta}$ зменшуватиметься. Таким чином МНК за умов (6) має властивість регуляризації, подібно до регуляризації за Тихоновим [10]. Остання полягає в мінімізації функціонала:

$$I = \varepsilon^T\varepsilon = (Y - X^*)^T(Y - X^*) + \alpha\hat{\beta}^T\hat{\beta}. \quad (11)$$

де α – параметр регуляризації.

З необхідної умови мінімуму виразу (11),

$$\frac{\partial I}{\partial \hat{\beta}} = 0 = 2(X^{*T}X^*\hat{\beta} - X^{*T}Y + \alpha\hat{\beta}), \quad (12)$$

отримаємо занижену по нормі $\|\hat{\beta}\|$, але регуляризовану МНК – оцінку:

$$\hat{\beta} = (X^{*T}X^* + \alpha I)^{-1}X^{*T}Y. \quad (13)$$

Зіставляючи (8) і (13), бачимо, що в МНК параметр α дорівнює $\text{diag} \sigma_i^2 \cdot m$. Слід вказати ще на один недолік МНК. МНК-оцінки (7) знаходяться як координата точки мінімуму функціоналу $\varepsilon^T\varepsilon$. Оскільки функціонал є усередненим на кінцевому інтервалі T значенням квадрата ε , яке є сумішшю корисного сигналу $Y^* - X^*\beta$ і випадковою збурення $N_Y - N_X\beta$, то він, як функція від β , не є точним. Тому операція диференціювання $\frac{\partial}{\partial \beta}(\varepsilon^T\varepsilon)$ зашумленої функції $\varepsilon^T\varepsilon$ є некоректною [10]. Саме цим обумовлено невисоку точність МНК-оцінок на коротких сильно зашумлених вибірках даних Y , навіть за точних X^* .

Метод, який пропонується використовувати в реальних умовах

Отже бажано зменшити розкид значень функціонала I . Це можливо зробити шляхом додаткового усереднення на множині квазістатистично незалежних функціоналів, близьких до середньоквадратичного для точних даних. Такими функціоналами мо-

жуть бути зсунуті у часі t на інтервал θ середні добутки $\frac{1}{T}\int_0^T \varepsilon(t)\varepsilon(t+\theta)dt$. Усереднюючи їх на інтервалі $[-\tau_1, \tau_1]$, отримаємо функціонал:

$$I = \frac{1}{2} \int_{-\tau_2}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T \varepsilon(t)\varepsilon(t+\theta) dt d\theta, \quad (14)$$

де $\eta(\theta)$ — функція ваги.

З необхідної умови мінімуму показника (14) по β_k , $k = \overline{1, n}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial \beta_k} &= \frac{1}{2} \times \\ &\times \int_{-\tau_1}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T \left[\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial \beta_k} \varepsilon(t+\theta) + \varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t+\theta)}{\partial \beta_k} \right] dt d\theta = \\ &= \int_{-\tau_1}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T (-x_k(t)) \left[y(t+\theta) - \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(t+\theta) \right] + \\ &+ (-x_k(t+\theta)) \left[y(t) - \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(t) \right] dt d\theta = 0, \quad k = \overline{1, n}; \end{aligned} \quad (15)$$

отримаємо систему рівнянь:

$$A \cdot B, \quad (16)$$

де A — матриця $n \times n$ з елементами a_{ik} ; B — матриця-стовпчик $n \times 1$ з елементами b_k :

$$a_{ik} = \sum_{l=-p}^p \eta(l) \sum_{j=1}^M [(x_i(j+1))x_k(j) + x_i(j)x_k(j+1)],$$

$$b_k = \sum_{l=-p}^p \eta(l) \sum_{j=1}^M [(y(j+1))x_k(j) + y(j)x_k(j+1)].$$

Розв'язок системи (16) дає шукану оцінку $\hat{\beta}$:

$$\hat{\beta} = A^{-1} \cdot B. \quad (17)$$

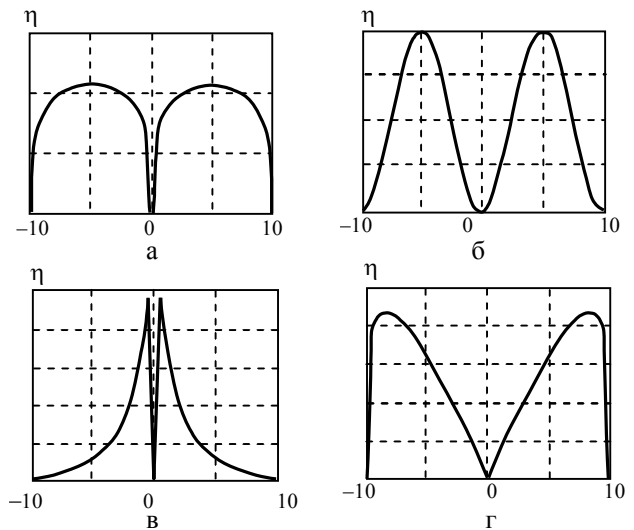


Рис. 2. Залежність $\eta(m, \theta, \gamma)$: а — $\theta = 0, \gamma = 0,1$; б — $\theta = 0, \gamma = 1$; в — $\theta = 2, \gamma = 0,1$; г — $\theta = 2, \gamma = 0,1$

Вагову функцію $\eta(m)$ знаходитимемо у класі симетричних відносно $m = 0$ фінітних функцій (таких, що $\eta(0) = \eta(\pm m_{кр}) = 0$). Наприклад:

$$\eta(m) = \eta(m, \gamma, \theta) = (1 + |m|)^\theta \left(1 - \cos \frac{|m|}{m_{кр}}\right)^\gamma, \quad (18)$$

де $\theta \in (\pm\infty), \gamma \in (0, \infty), m_{кр}$ визначається за умови

$$\det \left[X^T \left(X_{m_{кр.}} + X_{-m_{кр.}} \right) \right] \cong 0.$$

Параметри θ і γ оптимізуються за головним (зовнішнім) показником I [6, 11]. Параметр γ впливає на ширину імпульсу $\eta(m)$, а θ — на його асиметрію відносно максимуму (рис. 2). Теоретичний аналіз незміщеності і ефективності оцінок $\hat{\beta}$ (16) наведено в [6], числовий аналіз розглянуто далі на конкретному прикладі.

Співставлення МНК і запропонованого методу в задачі ідентифікації відображення $\omega^*(t)$ в $X^*(t)$

На якість параметричного оцінювання впливає ступінь взаємозв'язку змінних $x_i(t)$, $i = 1, n$, а не їх кількість. Тому обмежимося простим прикладом. Зв'язок між $\omega^*(t)$ і $X^*(t)$ (рис. 1):

$$x^*(t - t_3) = k\omega^*(t), \quad (20)$$

де t_3 — наближено відоме значення запізнення вимірів сигналу $x^*(t)$.

Якщо оператор запізнення $e^{-pt_3} = \frac{1}{e^{pt_3}}$ розкласти в ряд і обмежитись (внаслідок невеликого t_3 відносно періоду зміни корисного сигналу) першими членами, тобто

$$e^{pt_3} \cong 1 + t_3 p, \quad (21)$$

то, повертаючись до виразу (20) у часі, отримаємо подібне до (3) рівняння:

$$\frac{d\omega^*}{dt} = \beta_1^* \omega^*(t) + \beta_2^* x^*(t), \quad (22)$$

де $\beta_1^* = -\frac{1}{t_3}, \beta_2^* = -\frac{1}{t_3 \cdot k}$.

Рівняння (22) подамо у вигляді (4), де

$$y^* = \frac{d\omega^*}{dt}, x_1^* = \omega^*, x_2^* = x^*, \beta_1^* = \beta_2^* = 1;$$

$$y^*(k) = \beta_1^* x_1^*(k) + \beta_2^* x_2^*(k); k = \overline{1, 1000};$$

$$\beta_1^* = \beta_2^* = 1; x_1^* = \sin \frac{\pi k}{500}; x_2^* = \sin \left(\frac{\pi k}{500} + \frac{\pi}{6} \right).$$

На виміри $y(k), x_1(k), x_2(k)$ накладено білий шум — випадкові числа з рівномірним розподілом в діапазоні $[\pm 1]$. Для об'єктивного оцінювання зміщення і розкиду оцінок $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ відносно істинних β_1, β_2 згенеровано 10 статистично незалежних реалізацій шумів. Результати ідентифікації коефіцієнтів β_1, β_2 по МНК та запропонованим методом наведено в табл. 1.

Оцінки β_1 і β_2 по МНК (Табл. 1) занижено майже на 50% (9). Проте має місце регуляризація (13): розкид σ_{β_i} оцінок β_i складає 0,02 і 0,05. В запропонованому методі (Табл. 1) оцінки майже не зміщені: 1,005 і 0,943, але розкид більший, ніж у регуляризованому МНК (0, 15; 0,16). Зменшення розкиду можливе за рахунок компромісу між зміщенням і розкидом шляхом зміни параметрів θ і γ вагової функції $\eta(\theta)$. У випадку шуму тільки у вихідній змінній (Табл. 2) (ідеальна ситуація для МНК) оцінки незміщені, але розкид оцінок по МНК (0,07 і 0,09) більший розкиду (0,05 і 0,08) оцінок запропонованим методом без оптимізації параметрів θ і функції $\eta(m)$.

У випадку, якщо є можливість оптимізації $\eta(m)$ [8], вигравш запропонованого методу у сенсі незміщеності і ефективності оцінок відносно МНК буде суттєво більшим.

Таблиця 1

Результати оцінювання у випадку зашумленості $x(t)$ і $y(t)$ білим шумом

N	МНК – оцінювання		Оцінювання запропонованим методом	
	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
1	0,4790	0,4981	1,0282	0,9094
2	0,4607	0,4493	1,0179	0,8844
3	0,4843	0,5663	1,0916	0,8435
4	0,5024	0,5401	1,0020	0,9290
5	0,5246	0,4659	1,0313	0,9798
6	0,4997	0,5058	1,2904	0,7437
7	0,4849	0,5255	0,7093	1,2307
8	0,4919	0,4431	0,8283	1,1910
9	0,4676	0,4856	1,0825	0,7197
10	0,4642	0,6015	0,9653	1,0112
$\bar{\beta}$	0,4860	0,5082	1,0047	0,943
$\sigma_{\beta_i}^2$	0,00038	0,0026	0,0241	0,0283
σ_{β_i}	0,0197	0,0511	0,1551	0,1682

Результати оцінювання параметрів в ситуації зашумленості тільки вихідних змінних запропонованим методом і МНК представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати оцінювання
у випадку зашумленості тільки $y(t)$

N	МНК – оцінювання		Оцінювання запропонованим методом	
	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
1	0,9781	0,9212	0,9497	1,1019
2	1,0541	0,9371	1,0234	0,8554
3	0,9329	1,0817	0,9825	1,0618
4	1,1181	0,8819	1,0111	0,9132
5	0,9847	1,0327	1,1907	0,9807
6	1,0009	1,0192	1,1018	0,9823
7	1,1549	0,8258	0,9866	1,1244
8	0,9407	1,0765	1,0216	0,9879
9	0,9578	1,0823	0,9639	1,0861
10	1,0007	0,9412	1,0961	0,9946
$\bar{\beta}$	1,0123	0,9800	1,0280	1,0089
$\sigma_{\beta_i}^2$	0,0055	0,0083	0,0027	0,0073
σ_{β_i}	0,0744	0,0911	0,0522	0,0854

Використання запропонованого методу в системі ідентифікації (рис. 1) дозволить покращити точність стабілізації товщини плівки $X^*(t)$.

Висновки

Як показали теоретичні [6, 8] і експериментальні розрахунки, запропонований метод дозволяє в реальній ситуації зашумлених вимірів вхідних і вихідних сигналів первинних перетворювачів, отримати незміщені оцінки параметрів, близькі до оцінок по МНК для точних вимірів, а також розкид оцінок, менший розкиду для МНК. Це дає можливість ефективно використовувати його в системах адаптивного керування реальними об'єктами, наприклад, у загальних системах стабілізації технологічних параметрів процесу виробництва кабелів.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КАБЕЛЕЙ

Н.Я. Островерхов, А. Н. Сильвестров, Г.И. Кривобок

Благодаря возможностям современных информационных систем показаны пути совершенствования систем параметрической идентификации, а именно, получение более точных (чем общепринятым методом наименьших квадратов) оценок параметров математической модели изучаемого объекта с ограниченных во времени и диапазоне, зашумленных выборок данных о переменных состояниях и управляющих воздействиях. Рассмотренный метод идентификации предложен использовать в адаптивных системах управления отдельными технологическими процессами в производстве кабелей.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, МНК-оценивание, несмещенность, эффективность оценок, модификация МНК.

IDENTIFICATION OF DYNAMICS OF INSULATION APPLICATION PROCESS IN MANUFACTURE OF CABLES

M.Ya. Ostroverhov, A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka

Thanks to the capabilities of modern information systems, ways of improving parametric identification systems are shown, namely, obtaining more accurate estimates of the parameters of the mathematical model of the studied object from time-limited and range-limited, noisy samples of data on state variables and control actions (than the conventional least squares method). The considered identification method is proposed to be used in adaptive control systems for individual technological processes in the production of cables.

Keywords: parametric identification, OLS estimation, unbiasedness, estimation efficiency, modification of OLS.

Список літератури

1. Шидловський А.К. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. Монография / А.К. Шидловський, А.А. Щерба, В.М. Золотарев, А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. – 551 с.
2. Vahedy, V. Polymer insulated high voltage cables / V. Vahedy // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2006. – 2, – P. 13–18.
3. Бикинеева Ю.Л. Интегрированная система автоматизации кабельного производства / Ю.Л. Бикинеева, Е.И. Громаков, В.М. Павлов, А.М. Малышенко // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 5. – С. 69 – 74.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3 томах / Под ред. Н.Д. Егунова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2000. – 1000 с.
5. Тарарыкин С.В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами / С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков. – Иваново : ИГЭУ, 2000. – 212 с.
6. Островерхов М.Я. Системи і методи ідентифікації електротехнічних об'єктів : Монографія / М.Я. Островерхов, А.М. Сильвестров, О.М. Скринник. – К.: НАУ, 2016. – 324 с.
7. Минина О.М. Определение динамических характеристик и параметров типовых регулируемых объектов / О.М. Минина. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 46 с.
8. Сильвестров А.Н. Идентификация и оптимизация автоматических систем / А.Н. Сильвестров, П.И. Чинаев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
9. Эйххофф П. Основы идентификации систем управления / П.Эйххофф. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
10. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 286 с.
11. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А.Г. Ивахненко. – К.: Техніка, 1975. – 312 с.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Машков, університет Я. Свангелісти Пуркіне в Устінад-Лабем, Прага, Чехія.

Математичні моделі та методи

УДК 514.74+519.85

Н.И. Гиль, В.Н. Пацук

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЛИПСА И ОБЛАСТИ, ОГРАНИЧЕННОЙ ПАРАБОЛОЙ

В статье рассмотрен метод построения Φ -функции эллипса и параболы, что позволяет моделировать условия непересечения и включения в различных задачах геометрического проектирования: упаковки, раскроя, компоновки и т. п. Требуемые для построения Φ -функции выражения могут быть получены с учётом условий равенства угловых коэффициентов касательных в точках касания параболы и гомотетически преобразованного эллипса. Для получения условий включения применяется преобразование системы координат. В общем случае для нахождения точек эллипса и параболы, определяющих значение Φ -функции, допустимо и даёт хороший результат применение методов второго порядка для поиска оптимума.

Ключевые слова: Φ -функция, эллипс, парабола, непересечение, включение.

Описание задачи

Аналитическое представление условий взаимодействия геометрических объектов (непересечение, включение) является основой построения математических моделей при решении целого ряда практических задач геометрического проектирования, в том числе задач моделирования размещения в заданных областях объектов различной физической природы. Для некоторых классов геометрических объектов реализация этих условий осуществлена на основе Φ -функций [1], которые зависят от параметров размещения объектов и принимают отрицательные, равные нулю или положительные значения в зависимости от того, объекты пересекаются, касаются или не пересекаются.

Наиболее сложными с точки зрения формализации являются условия включения и взаимного непересечения объектов, ограниченных кривыми второго порядка. Известен подход к реализации условий взаимодействия эллипсов, основанный на аппроксимации границы эллипса дугами окружностей [2]. Однако, несмотря на простоту его реализации, погрешности аппроксимации, в связи с их накоплением, могут отрицательно сказываться на конечном результате решения задач размещения, особенно при достаточно большом количестве размещаемых объектов. В [3] рассмотрен подход к реализации этих условий, основанный на использовании уравнений эллипсов, который не требует аппроксимации, хотя является более трудоёмким в реализации по сравнению с [2].

В настоящей статье рассмотрен аналогичный подход к реализации условий взаимного расположения эллипса и области, ограниченной параболой.

Постановка и решение задачи непересечения

Пусть в системе координат xOy задана парабола P с параметром p и эллипс $L\{A, B, x_0, y_0, \vartheta\}$ с параметрами размещения (x_0, y_0, ϑ) и полуосями A, B , уравнения которых

$$y - px^2 = 0$$

и

$$B^2[(x - x_0) \cos \vartheta + (y - y_0) \sin \vartheta]^2 + A^2[-(x - x_0) \sin \vartheta + (y - y_0) \cos \vartheta]^2 - A^2B^2 = 0$$

соответственно (рис. 1).

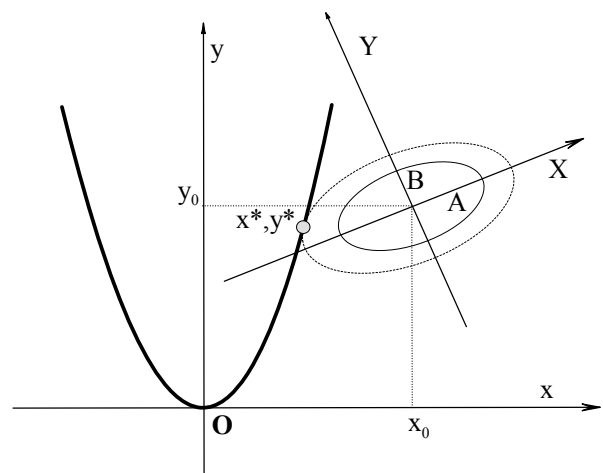


Рис. 1. Парабола и эллипс в произвольной ориентации

Обозначим через \bar{P} , \bar{L} области, ограниченные P и L соответственно.

Условия взаимного непересечения. Эллипс L не пересекается с областью \bar{P} , если существует точка (x^*, y^*) , для которой выполняются условия:

- точка (x^*, y^*) принадлежит параболе P и эллипсу $L_k \{kA, kB, x_0, y_0, \vartheta\}$;
- точка (x^*, y^*) не принадлежит области \bar{L} ;
- точки (O, p) и (x_0, y_0) находятся по разные стороны от касательной к параболе P в точке (x^*, y^*) ;
- угловые коэффициенты касательных к эллипсу L_k и к параболе P в точке (x^*, y^*) равны.

Представив эти условия в аналитическом виде, после необходимых преобразований имеем систему неравенств

$$\begin{cases} B^2[(x^* - x_0) \cos \vartheta + (px^{*2} - y_0) \sin \vartheta]^2 + \\ + A^2[-(x^* - x_0) \sin \vartheta + (px^{*2} - y_0) \cos \vartheta]^2 - \\ - A^2 B^2 \geq 0, \\ -y_0 + px^*(2x_0 - x^*) \geq 0 \end{cases}$$

и равенство

$$(D + 2pSx^*)(x^* - x_0) + (S + 2pRx^*)(px^{*2} - y_0) = 0,$$

где

$$D = B^2 \cos^2 \vartheta + A^2 \sin^2 \vartheta,$$

$$R = B^2 \sin^2 \vartheta + A^2 \cos^2 \vartheta,$$

$$S = (B^2 - A^2) \sin \vartheta \cos \vartheta.$$

Значение x^* , удовлетворяющее равенству при заданных значениях $(A, B, p, x_0, y_0, \vartheta)$, может быть найдено одним из вычислительных методов. Тогда выполнение неравенств, при полученном значении x^* , гарантирует непересечение эллипса и области, ограниченной параболой.

При $\vartheta = 0$ (эллипс ориентирован) имеем:

$$D = B^2, R = A^2, S = 0.$$

Тогда условия непересечения принимают вид:

$$\begin{cases} B^2(x^* - x_0)^2 + A^2(px^{*2} - y_0)^2 - A^2 B^2 \geq 0, \\ -y_0 + 2px_0 x^* - px^{*2} \geq 0, \end{cases}$$

где x^* удовлетворяет уравнению

$$B^2(x^* - x_0) + 2pA^2 x^*(px^{*2} - y_0) = 0.$$

Если $A = B = r_0$ (круг), то условия имеют вид:

$$\begin{cases} (x^* - x_0)^2 + (px^{*2} - y_0)^2 - r_0^2 \geq 0, \\ -y_0 + 2px_0 x^* - px^{*2} \geq 0, \end{cases}$$

где x^* удовлетворяет уравнению

$$(x^* - x_0) + 2px^*(px^{*2} - y_0) = 0.$$

Таким образом, Φ -функцию в задаче непересечения можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \Phi(x_0, y_0, \vartheta) = \\ = \min\{B^2[(x^* - x_0) \cos \vartheta + (px^{*2} - y_0) \sin \vartheta]^2 + \\ + A^2[-(x^* - x_0) \sin \vartheta + (px^{*2} - y_0) \cos \vartheta]^2 - A^2 B^2, \\ -y_0 + 2px_0 x^* - px^{*2}\}, \end{aligned}$$

где x^* удовлетворяет условию

$$2p^2 R x^{*3} + 3pS x^{*2} - [D - 2p(Sx_0 + Ry_0)]x^* - D x_0 - S y_0 = 0$$

и может быть найдено одним из численных методов.

Постановка и решение задачи включения

Условия включения эллипса L в область \bar{P} (рис. 2).

В результате ряда преобразований системы координат xOy (поворот на угол ϑ , "сжатие" по оси Ox с коэффициентом A/B , поворот на угол

$$2\alpha = \arctg \frac{2AB \sin \vartheta \cos \vartheta}{B^2 \sin^2 \vartheta - A^2 \cos^2 \vartheta}$$

парабола P в новой системе координат XOY превращается в параболу P'

$$Y^2 - 2p'X = 0,$$

а эллипс L превращается в круг $C\{B, X_0, Y_0\}$ радиуса B с центром в точке (X_0, Y_0) , где p', X_0, Y_0 выражаются через p, A, B, ϑ (рис. 3).

Тогда круг C является включением в область \bar{P}' , ограниченную параболой P' , а значит эллипс L является включением в область \bar{P} , если существует точка (X^*, Y^*) , для которой выполняются условия:

- точка (X^*, Y^*) принадлежит параболе P' и окружности

$$C_k \{kB, X_0, Y_0\};$$

- точка (X^*, Y^*) находится по ту же сторону от оси OX , что и центр (X_0, Y_0) ;

- точка (X_0, Y_0) принадлежит области \bar{P}' ;

- $X^* > \bar{X}$, где \bar{X} — абсцисса точки соприкосновения круга и параболы при $Y_0 = 0$ (рис. 3).

Значение \bar{X} однозначно определяется через B и p' , если кривизна k параболы в точке $(0, 0)$ больше кривизны окружности, в противном случае $\bar{X} = 0$;

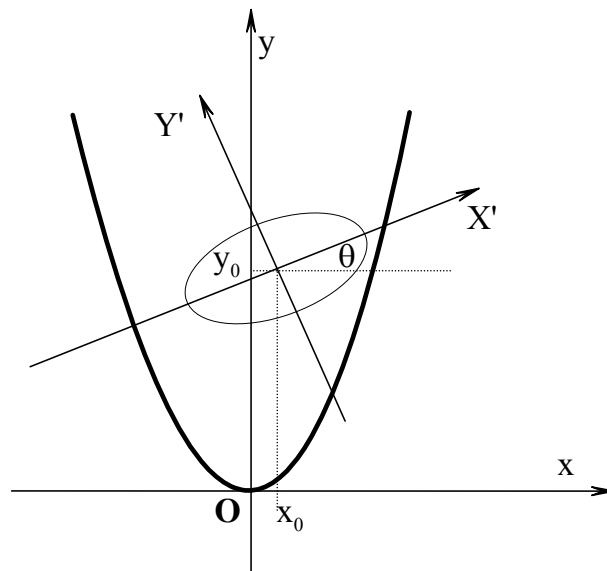


Рис. 2. Включення еліпса в область, ограниченную параболой.

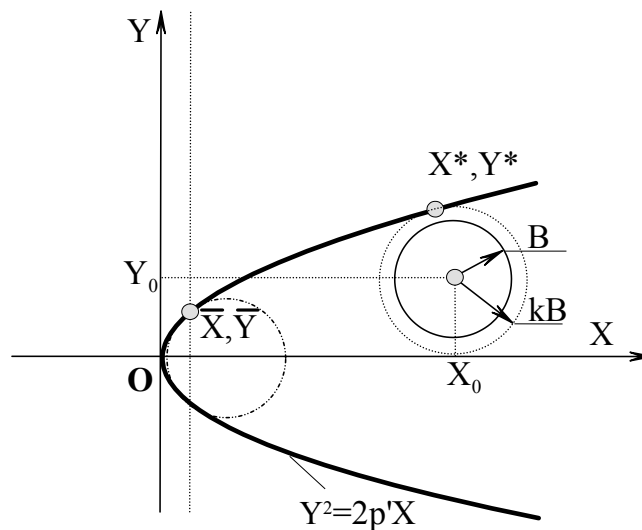


Рис. 3. Включення круга в область, ограниченную параболой, после преобразования.

- точка (X^*, Y^*) не принадлежит кругу C ;
- угловые коэффициенты касательных к параболе P' и к окружности C_k в точке (X^*, Y^*) равны.

и равенство

$$p'(Y^* - Y_0) + Y^* \left(\frac{1}{2p'} Y^{*2} - X_0 \right) = 0.$$

Представив эти условия в аналитическом виде, после необходимых преобразований имеем систему неравенств

Здесь

$$\begin{cases} Y^* \cdot Y_0 \geq 0, \\ X_0 - \frac{1}{2p'} Y_0^2 \geq 0, \\ \frac{1}{2p'} Y^{*2} - \bar{X} \geq 0, \\ \left(\frac{1}{2p'} Y^{*2} - X_0 \right)^2 + (Y^* - Y_0)^2 - B^2 > 0 \end{cases}$$

$$p' = \frac{AB^2}{2p(A^2 \cos^2 \vartheta + B^2 \sin^2 \vartheta)^{3/2}},$$

$$X_0 = \frac{B}{A} (x_0 \cos \vartheta + y_0 \sin \vartheta) \cos 2\varphi - (x_0 \sin \vartheta - y_0 \cos \vartheta) \sin 2\varphi,$$

$$Y_0 = -\frac{B}{A} (x_0 \cos \vartheta + y_0 \sin \vartheta) \sin 2\varphi - (x_0 \sin \vartheta - y_0 \cos \vartheta) \cos 2\varphi,$$

$$\sin 2\varphi = -\frac{2AB\sin \vartheta \cos \vartheta}{A^2 \cos^2 \vartheta + B^2 \sin^2 \vartheta},$$

$$\cos 2\varphi = -\frac{A^2 \cos^2 \vartheta - B^2 \sin^2 \vartheta}{A^2 \cos^2 \vartheta + B^2 \sin^2 \vartheta},$$

$$\bar{X} = \frac{4p^2(A^2 \cos^2 \vartheta + B^2 \sin^2 \vartheta)^3 - A^2 B^2}{4pA(A^2 \cos^2 \vartheta + B^2 \sin^2 \vartheta)^{3/2}},$$

$$\kappa = \frac{2p(A^2 \cos^2 \vartheta + B^2 \sin^2 \vartheta)^{3/2}}{AB^2}.$$

Значение Y^* , удовлетворяющее равенству при заданных значениях $A, B, p, x_0, y_0, \vartheta$, может быть вычислено одним из вычислительных методов. Тогда выполнение неравенств, при полученном значении Y^* , гарантирует включение эллипса в область, ограниченную параболой.

Включение эллипса L в область \bar{P} , ограниченную параболой P , можно рассматривать как непересечение эллипса L и области $R^2 \setminus \bar{P}$, являющейся дополнением к области \bar{P} .

Исходя из вышеизложенного, соответствующую Φ -функцию можно представить в виде:

$$\Phi(x_0, y_0, \vartheta) =$$

$$= \min\{Y^* \cdot Y_0, X_0 - \frac{1}{2p'} Y_0^2, \frac{1}{2p'} Y^{*2} - \bar{X},$$

$$\left(\frac{1}{2p'} Y^{*2} - X_0\right)^2 + (Y^* - Y_0)^2 - B^2\},$$

где Y^* удовлетворяет условию

$$Y^{*3} + 2p'(p' - X_0)Y^* - 2p'^2 Y_0 = 0$$

и может быть найдено одним из численных методов.

Выводы

Получены условия, позволяющие построить Φ -функции эллипса и обеих бесконечных областей, границей которых является парабола.

В обоих случаях полученные выражения позволяют получить требуемые значения комбинацией аналитических выражений и применением одного из простейших вычислительных методов решения одномерной гладкой задачи оптимизации.

Список литературы

1. Stoyan Yu.G. Φ -function and its basic properties // Докл. АН Украины. Сер. А. – 2001. – № 8. – С. 112–117.
2. Stoyan Yu. Cutting and Packing problems for irregular objects with continuous rotations: mathematical modeling and nonlinear optimization / Yu. Stoyan, A. Pankratov, T. Romanova // Journal of Operational Research Society, Volume 67, Issue 5, P. 786–800.
3. Гиль Н.И. Аналитическое представление условий включения и взаимного непересечения эллипсов / Гиль Н.И., Пацук В.Н. // Материалы 5-й международной конференции "Математическое моделирование, оптимизация и информационные технологии", 22-25 марта 2016 г., Кишинэу, Молдова. – 2016. – Том 2. – С. 59–65.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Більчук, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

АНАЛИТИЧНИЙ ОПИС УМОВ ВЗАЄМНОГО РОЗТАШУВАННЯ ЕЛІПСА ТА ОБЛАСТІ, ОБМЕЖЕНОЇ ПАРАБОЛОЮ

М.І. Гіль, В.М. Пацук

В статті розглянуто метод побудови Φ -функції еліпса та параболі. Φ -функція дозволяє моделювати умови неперетину та включення в різних задачах геометричного проектування: упакування, розкряю, компоновки і т. п. Необхідні для побудови Φ -функції вирази можна отримати з урахуванням умов рівності кутових коефіцієнтів дотичних прямих у точках дотику параболі і гомотетично перетвореного еліпса. Для отримання умов включення застосовується перетворення системи координат. У загальному випадку для знаходження точок еліпса і параболі, що визначають значення Φ -функції, допустимо і дає добрий результат застосування методів другого порядку для пошуку оптимума.

Ключові слова: Φ -функція, еліпс, парабола, неперетин, включення.

AN ANALYTICAL DESCRIPTION OF MUTUAL PLACEMENT CONDITIONS FOR AN ELLIPSE AND A REGION RESTRICTED BY A PARABOLA

M.I. Gil, V.M. Patsuk

A method of construction of a Φ -function of an ellipse and a parabola is considered. Φ -function allows to model non-intersection and inclusion conditions in different geometric design problems: packing, cutting, arrangement, etc. Necessary expressions for Φ -function construction can be obtained using the conditions of tangent coefficient equality in tangent points of the parabola and the homothetically transformed ellipse. To obtain inclusion condition a coordinate system transformation is applied. In the general case an application of second-order methods for optimum search is acceptable and gives a good result for finding the points of the ellipse and the parabola which determine Φ -function value.

Keywords: Φ -function, ellipse, parabola, non-intersection, inclusion.

УДК 519.2 : 519.7

В.Ю. Дубницький, Л.Д. Филатова, А.И. Ходырев

Харьковский учебно-научный институт ГВУЗ «Университет банковского дела», Харьков

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ОЦЕНКИ ЭНТРОПИИ НЕПРЕРЫВНОЙ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ, ЗАДАННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В работе сформулирована задача определения относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины. Решение задачи получено по правилу определения относительной погрешности, появляющейся при вычислении значений функций многих аргументов. Абсолютные погрешности аргументов определены как разность верхнего и нижнего значений доверительных интервалов параметров распределений или доверительных интервалов среднего значения и среднеквадратического отклонения параметров выборки. Получены выражения для определения величины относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины, распределённой по нормальному закону, логистическому, гамма-распределению, распределению Вейбулла, логарифмически нормальному и показательному законам распределения вероятности.

Ключевые слова: энтропия, оценка энтропии, относительная погрешность, энтропия нормального закона распределения, энтропия логистического закона распределения, энтропия гамма-распределения, энтропия распределения Вейбулла, энтропия логарифмически нормального и показательного законов распределения вероятности.

Введение

Общепринятая последовательность изучения свойств случайной величины X , заданной своей выборкой $\hat{X} = (x_1, \dots, x_u, \dots, x_m)$, $m < \infty$, следующая. Для полученных выборочных данных строят гистограмму, определяют оценки среднего значения и среднеквадратического отклонения \bar{x} и s соответственно. После этого формулируют нулевую статистическую гипотезу о том, что полученные данные не противоречат некоторому закону распределения случайной величины X , определяют параметры этого закона и проверяют правильность сформулированной гипотезы. Этот процесс хорошо изучен и рассмотрен в многочисленных учебных пособиях. Намного меньше изучен процесс получения оценки энтропии случайной величины.

В соответствии с работой [1] энтропией Шеннона непрерывной случайной величины X , имеющей плотность распределения $f(x)$, называют функционал вида:

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_a f(x) dx \quad (\text{ед}). \quad (1)$$

В данной работе принято, что $a = e$, основанию натуральных логарифмов. Следовательно, условие (1) примет вид:

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln f(x) dx \quad (\text{нит}). \quad (2)$$

Далее в работе принято, что при определении численного значения энтропии $H(X)$ наименование (нит) указываться не будет. Так, как в данном сообщении все числовые характеристики плотности распределения $f(x)$ определяли в предположении, что

исходные данные для них получены по результатам выборочных наблюдений, то величина:

$$h(X) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln f(x) dx; \quad (3)$$

будет одной из статистик, характеризующих выборку \hat{X} . Некоторые особенности получения статистической оценки этой величины и будут рассмотрены в данной работе. Содержание понятий «статистика» и «статистическая оценка», принятые в данной работе, соответствует определениям этих понятий, приведенным в работе [2].

Анализ литературы. Первоначально задача оценки энтропии была рассмотрена в работах [3, 4, 5]. Оценка энтропии случайной величины, заданной своей гистограммой, рассмотрена в работах [6, 7, 8]. Сведений о способах решения задачи, сформулированной в заглавии данной работы, в доступной авторам литературе не найдено.

Постановка задачи. Предложить методику получения статистической оценки энтропии непрерывной случайной величины и погрешности полученного результата.

Полученные результаты

Предположим, что непрерывная случайная величина X задана функцией плотности распределения вида:

$$f = f(x; \lambda, \mu); \quad (4)$$

где λ, μ – параметры распределения. Без уменьшения общности далее будем рассматривать функции плотности распределения, для которых количество параметров не более двух. Параметры распределения λ, μ в свою очередь можно представить в виде

функций таких статистических характеристик выборки, как среднее значение \bar{x} и среднее квадратическое отклонение s , т.е.:

$$\lambda = u(\bar{x}, s); \mu = v(\bar{x}, s). \quad (5)$$

Конкретные виды этих функций приведены в работе [9]. Подставив условие (5) в (3) получим, что:

$$h(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \ln f(x; \lambda, \mu) f(x; \lambda, \mu) dx = w(\lambda, \mu). \quad (6)$$

Зависимости вида $w(\lambda, \mu)$ приведены в работе [10]. Следовательно, получим, что:

$$h(x) = w(u(\bar{x}, s), v(\bar{x}, s)) = \phi(\bar{x}, s). \quad (7)$$

Оценить погрешность выражения вида (7) можно двумя способами. Первый основан на использовании методов, описанных в работах [11, 12, 13]. В соответствии с этим способом абсолютную погрешность определения оценки энтропии можно определить по условию:

$$h - t_\alpha s(h) \leq h \leq h + t_\alpha s(h); \quad (8)$$

где t_α – коэффициент, обеспечивающий с заданным уровнем доверительной вероятности α соответствующую величину доверительного интервала. Величину среднего квадратического отклонения оценки h , равную $s(h)$, определяют по условию:

$$s(h) = \left[\left(\frac{\partial w}{\partial \lambda} \right)^2 s^2(\lambda) + \left(\frac{\partial w}{\partial \mu} \right)^2 s^2(\mu) + 2 \frac{\partial w}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial w}{\partial \mu} \cdot K(\lambda, \mu) \right]^{1/2}. \quad (9)$$

В условии (9) принято, что $s^2(\lambda)$ и $s^2(\mu)$ – дисперсии оценок параметров λ, μ . Величина $K(\lambda, \mu)$ равна коэффициенту ковариации соответствующих оценок. Эта величина может быть получена только при оценивании параметров распределения методом максимума правдоподобия. В нашем случае это приводит к неоправданным вычислительным трудностям. Определение дисперсии оценок параметров также является весьма непростой задачей. Поэтому в первом приближении к решению поставленной задачи для оценки параметров в работе использован метод моментов. Для получения решения задачи об определении погрешности оценки энтропии в работе использованы методы, применяемые в численном анализе.

В рамках данной работы будем различать погрешность по параметрам и погрешность по числовым характеристикам. В соответствии с работой [14] относительную погрешность $\delta(h)$ оценки энтропии h по параметрам вычислим используя условие:

$$\delta(h(\lambda, \mu)) = \left| \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln w(\lambda, \mu) \right| \Delta(\lambda) + \left| \frac{\partial}{\partial \mu} \ln w(\lambda, \mu) \right| \Delta(\mu). \quad (10)$$

Относительную погрешность оценки энтропии по числовым характеристикам вычислим, используя условие:

$$\delta(h(\bar{x}, s)) = \left| \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \ln \phi(\bar{x}, s) \right| \Delta(\bar{x}) + \left| \frac{\partial}{\partial s} \ln \phi(\bar{x}, s) \right| \Delta(s). \quad (11)$$

Погрешность по параметрам, по нашему мнению, следует применять, если известны выражения для их доверительных интервалов или получение функции $\phi(\bar{x}, s)$ в явном виде сопряжено с неоправданным усложнением решения поставленной задачи, или принципиально невозможно. Последнее справедливо для распределения Вейбулла. Исчерпывающе это рассмотрено в работах [16, 17].

В рамках данной работы вычисление величин $\Delta(\bar{x}), \Delta(s)$ выполняли при условии, что распределение величины X нормальное. Это позволяет, учитывая экстремальные свойства энтропии нормального распределения [15], получить верхние оценки абсолютных и, следовательно, относительных погрешностей, существенно упрощая процесс получения решения. Доверительные интервалы для величин \bar{x} и s определяли по общепринятым методикам в том виде, в котором они изложены в работе [18].

Верхнее значение для величины \bar{x} определим по условию:

$$\bar{x}^B(\gamma) = \bar{x} + t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}}; \quad (12)$$

где n – объём выборки, t_γ – γ -квантиль распределения Стьюдента с $(n - 1)$ степенью свободы. При уровне доверительной вероятности $\alpha=0,95$ получим, что $\gamma=(1+\alpha)/2=0,975$. Нижнее значение определим по условию:

$$\bar{x}^H(\gamma) = \bar{x} - t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (13)$$

Из условий (12) и (13) получим, что:

$$\Delta_\gamma(\bar{x}) = \bar{x}^B(\gamma) - \bar{x}^H(\gamma) = 2t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (14)$$

Верхнюю границу величины s определим по условию:

$$s_n^B = \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(\gamma'')}} \cdot s. \quad (15)$$

Нижнюю границу величины s определим по условию:

$$s_n^H = \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(\gamma')}} \cdot s. \quad (16)$$

В условиях (15, 16) принято, что $\chi^2(\gamma)$ – γ -квантиль распределения χ^2 с $(n - 1)$ степенью свободы, $\gamma' = (1 + \alpha) / 2$, $\gamma'' = (1 - \alpha) / 2$. Отсюда следует, что:

$$\Delta_\gamma(s) = s \left[\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(\gamma'')}} - \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(\gamma')}} \right]. \quad (17)$$

В некоторых случаях вместо условий (10), (11) будем использовать эквивалентные им условия:

$$\delta(h(\lambda, \mu)) = \left| \frac{\partial}{\partial \lambda} w(\lambda, \mu) / w(\lambda, \mu) \right| \Delta_\gamma(\lambda) + \left| \frac{\partial}{\partial \mu} w(\lambda, \mu) / w(\lambda, \mu) \right| \Delta_\gamma(\mu) \quad (18)$$

и

$$\delta(h(\bar{x}, s)) = \left| \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \phi(\bar{x}, s) / \phi(\bar{x}, s) \right| \Delta_\gamma(\bar{x}) + \left| \frac{\partial}{\partial s} \phi(\bar{x}, s) / \phi(\bar{x}, s) \right| \Delta_\gamma(s). \quad (19)$$

Без уменьшения общности рассмотрим однопараметрическую функцию плотности распределения $f(x, \lambda)$, для которой энтропия $h(x)=w(\lambda)$.

$$\delta(h(\lambda)) = \left| \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln w(\lambda) \right| \Delta_\gamma(\lambda) = \left| \frac{w'_\lambda}{w(\lambda)} \right| \Delta_\gamma(\lambda). \quad (20)$$

Рассмотрим применение предложенной методики на примерах, для которых использованы наиболее распространённые виды функций плотностей

распределений, используемые при решении задач надежности систем. Сведения о них приведены в табл. 1.

В табл. 2, построенной по результатам работы [10] приведены выражения для вычисления энтропии для $h(x)$ распределений, указанных в табл. 1 в виде функции параметров распределения $h(x) = \omega(\lambda, \mu)$. В этой таблице и далее принято, что $\Gamma(\mu)$ – гамма-функция аргумента μ , $\Psi(\mu)$ – дигамма-функция аргумента μ , определяемая по условию:

$$\Psi(\mu) = \frac{d}{d\mu} \ln \Gamma(\mu) = \frac{\Gamma'(\mu)}{\Gamma(\mu)}. \quad (21)$$

Подробные сведения о свойствах этой функции приведены в работе [19], C – постоянная Эйлера, $C = 0,5772$. В табл. 3 приведены, полученные на основе данных табл. 1 и 2, выражения для энтропии случайной величины, как функции числовых характеристик выборки, то есть, функции

$$h = \phi(\bar{x}, s).$$

Таблица 1

Функции плотности распределения и оценки их параметров

Функции плотности распределения при $-\infty < x < \infty$		
Тип распределения (условное обозначение)	Плотность распределения	Зависимость параметров распределения от его начальных характеристик
Нормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\lambda^2}\right)$	$\mu = m$ $\lambda = s$
Логистическое распределение	$f(x) = \frac{\exp((x-\mu)/\lambda)}{\lambda[1+\exp((x-\mu)/\lambda)]^2} = \frac{1}{4\lambda ch^2((x-\mu)/(2\lambda))}$	$\mu = m$ $\lambda = \frac{s\sqrt{3}}{\pi} = 0,55133s$
Функции плотности распределения при $0 \leq x < \infty$		
Гамма-распределение	$f(x) = \frac{\lambda^\mu}{\Gamma(\mu)} x^{\mu-1} e^{-\lambda x}, x>0.$	$\mu = \frac{(\bar{x})^2}{s^2}, \lambda = \frac{m}{s^2}$
Распределение Вейбулла	$f(x) = (\lambda/\mu)(x/\mu)^{\lambda-1} \exp[-(x/\mu)^\lambda]$	Выражение в явном виде отсутствует
Логарифмически нормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{\lambda x \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x/\mu)]^2}{(2\lambda^2)}\right\}$	$\mu = \ln \frac{\bar{x}}{\sqrt{1+(s/\bar{x})^2}}, \lambda = \sqrt{\ln\left(1+(s/\bar{x})^2\right)}$
Показательное распределение	$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$	$\lambda = 1/\bar{x}$

Таблица 2

Энтропия случайной величины, как функция параметров её распределения

Вид функции распределения	Функция $h(x) = \omega(\lambda, \mu)$
Нормальное распределение	$h(x) = \frac{1}{2} \ln(2\pi e \lambda^2)$
Логистическое распределение	$h(x) = \ln(\lambda e^2)$
Гамма-распределение	$h(x) = \ln[\Gamma(\mu)] - \ln \lambda + \mu + (1-\mu)\Psi(\mu)$
Распределение Вейбулла	$h(x) = \ln\left(\frac{\mu}{\lambda}\right) + C \frac{\lambda-1}{\lambda} + 1$
Логарифмически нормальное распределение	$h(x) = \ln(2\pi e \lambda^2 \mu^2)$
Показательное распределение	$h(x) = \ln(e/\lambda)$

Энтропия случайной величины, как функция числовых характеристик выборки

Вид функции распределения	Функция $h = \phi(\bar{x}, s)$.
Нормальное распределение	$h(x) = \frac{1}{2} \ln(2\pi es^2)$
Логистическое распределение	$h(x) = \frac{1}{2} \ln(5,1910s^2)$
Гамма-распределение	$h(x) = \ln \left[\Gamma \left(\frac{\bar{x}^2}{s^2} \right) \right] - \ln \frac{m}{s^2} + \frac{\bar{x}^2}{s^2} + \left(1 - \frac{\bar{x}^2}{s^2} \right) + \Psi \left(\frac{\bar{x}^2}{s^2} \right)$
Распределение Вейбулла	Выражение в явном виде отсутствует
Логарифмически нормальное распределение	$h(x) = \ln \left(2\pi e \ln \left(1 + (s/\bar{x})^2 \right) \ln^2 \left(\bar{x} / \sqrt{1 + (s/\bar{x})^2} \right) \right)$
Показательное распределение	$h(x) = \ln(\bar{x}e)$

Выполнив действия, описанные условиями (10)...(19), получим выражение для определения относительной погрешности оценки энтропии нормально распределённой непрерывной случайной величины в виде:

$$\delta(h(s)) = \frac{\Delta_\gamma(s)}{s}. \quad (22)$$

Выражение для определения относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины, распределённой по логистическому закону, получим в виде:

$$\delta(h(s)) = \frac{\Delta_\gamma(s)}{s}. \quad (23)$$

Совпадение условий (22) и (23) подтверждает возможность замены в некоторых случаях нормального распределения логистическим, на что было указано в работе [20].

Выражение для определения относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины, подчиняющейся гамма-распределению, получим в виде функции $h(x)=\omega(\lambda,\mu)$ используя условие (18):

$$\delta(h(x)) = \frac{|-1/\lambda|}{\ln[\Gamma(\mu)] - \ln \lambda + \mu + (1-\mu)\Psi(\mu)} \Delta_\gamma(\lambda) + \frac{|1 + (1-\mu)\Psi'(\mu)|}{\ln[\Gamma(\mu)] - \ln \lambda + \mu + (1-\mu)\Psi(\mu)} \Delta_\gamma(\mu). \quad (24)$$

В условии (24) принято, что $\Psi'(\mu)$ – тригамма-функция, свойства которой описаны в работе [19].

Выражение для определения относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины, подчиняющейся закону Вейбулла, примет вид:

$$\delta(h(x)) = \left| \lambda / \left(\mu \left[\ln \left(\frac{\mu}{\lambda} \right) + C \frac{\lambda-1}{\lambda} + 1 \right] \right) \right| \Delta_\gamma(\mu) + \left| (c-\lambda) / \left(\lambda \left[\ln \left(\frac{\mu}{\lambda} \right) + C \frac{\lambda-1}{\lambda} + 1 \right] \right) \right| \Delta_\gamma(\mu). \quad (25)$$

Выражение для определения относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины, подчиняющейся логарифмически нормальному закону распределения, примет вид:

$$\delta(h(x)) = \frac{2\lambda}{\ln(2\pi e \lambda^2 \mu^2)} \Delta_\gamma(\lambda) + \frac{2\mu}{\ln(2\pi e \lambda^2 \mu^2)} \Delta_\lambda(\mu). \quad (26)$$

Выражение для определения относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины, подчиняющейся показательному закону распределения, примет вид:

$$\delta(h(\bar{x})) = \left| 1 / \left(\bar{x} (\ln(\bar{x} + 1)) \right) \right| \Delta_\gamma(\bar{x}). \quad (27)$$

Процедура получения конкретных значений выражений для определения относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины должна стать темой дальнейших исследований.

Выводы

1. В работе сформулирована задача определения относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины.

2. Решение задачи получено по правилу определения относительной погрешности, появляющейся при вычислении значений функций многих аргументов.

3. Абсолютные погрешности аргументов определены как разность верхнего и нижнего значений доверительных интервалов параметров распределений или доверительных интервалов среднего значения и среднеквадратического отклонения параметров выборки.

4. Получены выражения для определения величины относительной погрешности оценки энтропии непрерывной случайной величины, распределённой по нормальному закону, логистическому, гамма-распределению, распределению Вейбулла, логарифмически нормальному и показательному законам распределения вероятности.

Список літератури

1. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования / И.В. Кузьмин, В.А. Кедрус. – К.: Вища школа, 1986. – 238 с.
2. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. – Москва.: БСЭ, 1999. – 910 с.
3. Добрушин Р.Л. Упрощенный метод экспериментальной оценки энтропии случайных последовательностей / Р.Л. Добрушин // Теория вероятностей и её применение. – 1958. – Т.3. – Выпуск 4. – С. 462-464.
4. Зубков А.М. Предельные распределения статистической оценки энтропии / А.М. Зубков // Теория вероятностей и её применение. – 1973. – Т.18. – Выпуск 3. – С. 643-650.
5. Михайлов В.Г. Статистическое оценивание энтропии дискретных случайных величин с большим числом исходов / В.Г. Михайлов, В.А. Ватулин // Успехи математических наук. – 1995. – том 50. – Выпуск 5 (305). – С. 121-13.
6. Гайдышев И.П. Моделирование стохастических и детерминированных систем: Руководство польз. прогр. Atte Stat / И.П. Гайдышев-Курган.: БИ, 2015. – 484 с.
7. Электрические измерения неэлектрических величин / [А.М. Турчин, П.В. Новицкий, Е.С. Левшина и др.] под ред. П.В.Новицкого. – Ленинград.: «Энергия», 1975. – 576 с.
8. Дубницький В.Ю. Устойчивость оценки энтропии гистограммы непрерывной случайной величины по отношению к изменению количества её интервалов / В.Ю. Дубницький, Л.Д. Філатова, А.І. Ходырев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2017. – Вип. 5(45). – С. 42-46.
9. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. / Р.Н. Вадзинский. – М.: Наука, 2001. – 295 с.
10. Michlowicz J. V. Handbook of DIFFERENTIAL ENTROPY / J.V. Michlowicz, J.M. Nichols, Bucholtz F. – New York.: A.CHAPMAN & HALL, 2014. – 220 p.
11. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. / ISO, Switzerland, 1993.
12. ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001).
13. Поджаренко В.О., Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності. Навчальний посібник. / В.О. Поджаренко, О.М. Васілевський, В.Ю. Кучерук. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 158 с.
14. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – Москва : Наука, 1966. – 664 с.
15. Лифшиц Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления. В 2 т. Т.1. Вероятностные и статистические характеристики воздействий и процессов. Линейные стационарные и нестационарные системы. / Н.А.Лифшиц, В.Н. Пугачёв. – Москва : Советское радио, 1963. – 896 с.
16. ГОСТ 11.007-75. Правила определения оценок параметров и доверительных границ для параметров распределения Вейбулла / Москва.: Издательство стандартов, 1976. – 30 с.
17. ГОСТ 11.011 – 83. Правила определения оценок параметров и доверительных границ для параметров гамма - распределения / Москва.: Издательство стандартов, 1985. – 49 с.
18. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
19. Бейтмен Г. Высшие трансцендентные функции. Гипергеометрическая функция. Функции Лежандра / Г. Бейтмен, А. Эрдейи – Москва : НАУКА, 1973. – 296 с.
20. Дубницький В.Ю. Аппроксимация функции нормального распределения функцией логистического распределения и её применение для определения надёжности технических систем / В.Ю. Дубницький, И.А. Черепнев, Г.В. Фесенко // Вісник Харківського технічного ун-ту сільськогосподарства, 2017. – Вип. 180. – С. 168-181.

Надійшла до редколегії 1.08.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Можаяєв, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

ВІДНОСНА ПОХИБКА ОЦІНКИ ЕНТРОПІЇ НЕПЕРЕРВНОЇ ВИПАДКОВОЇ ВЕЛИЧИНИ, ЯКА ЗАДАНА ЩІЛЬНІСТЮ РОЗПОДІЛУ

В.Ю. Дубницький, Л.Д. Філатова, О.І. Ходырев

У роботі сформульовано задачу визначення відносної похибки оцінки ентропії неперервної випадкової величини. Розв'язок задачі отримано за правилом визначення відносної похибки, що з'являється при обчисленні значень функцій багатьох аргументів. Абсолютну похибку кожного з аргументів визначено як різницю верхнього і нижнього значень довірчих інтервалів параметрів розподілів або довірчих інтервалів середнього значення і середньоквадратичного відхилення параметрів вибірки. Отримано вирази для визначення величини відносної похибки оцінки ентропії неперервної випадкової величини, розподіленої згідно з нормальним законом, логістичним, гамма-розподілом, розподілом Вейбулла, логарифмічно нормальним та показниковим законам розподілу ймовірності.

Ключові слова: ентропія, оцінка ентропії, відносна похибка, ентропія нормального закону, ентропія логістичного, ентропія гамма-розподілу, ентропія розподілу Вейбулла, ентропія логарифмічно нормального розподілу, ентропія показникового закону розподілу.

RELATIVE ERROR FOR ENTROPY ESTIMATION OF DISTRIBUTION DENSITY-SPECIFIED CONTINUOUS RANDOM QUANTITY

V. Yu. Dubnitskiy, L.D. Filatova, A.I. Khodyrev

The work formulates problem of relative error definition for entropy estimation of a continuous random quantity. The problem is solved according to definition rule of relative error appearing under calculation of multivariable function values. Absolute error of each argument was defined as difference between top and bottom confidence interval values of distribution parameters or average value confidence intervals and mean-square deviation of sample parameters. Expressions were found to define the value of relative error for entropy estimation of a continuous random quantity, this value being distributed under normal law, logistical distribution, gamma distribution, Weibull's distribution, lognormal and exponential distribution.

Keywords: entropy, entropy estimation, relative error, normal law entropy, logistical distribution entropy, gamma distribution entropy, Weibull's distribution entropy, lognormal distribution entropy, exponential distribution law entropy.

УДК 355.35

А.В. Ковтун, О.В. Іванченко, А.О. Іванченко, І.В. Бойков

Національна академія Національної гвардії України, Харків

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

В статті приводяться результати дослідження по удосконаленню математичної моделі зміни технічного стану автомобільної техніки з урахуванням індивідуальних особливостей, умов експлуатації автомобільної техніки та впливу складу паливної суміші на роботу двигуна.

Ключові слова: технічний стан, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічної готовності, закон розподілу, умови експлуатації.

Вступ

Постановка проблеми. Серед основних факторів, які впливають на високу бойову готовність (БГ) частин і підрозділів Національної гвардії України (НГУ) є технічний стан (ТС) автомобільної техніки (АТ).

Одним з невирішених питань є можливість точного оцінювання цього стану.

На цей час технічна готовність парку АТ у НГУ характеризується коефіцієнтом технічної готовності (Ктг), що є відношенням кількості справної АТ до загальної кількості АТ [1]. Основними недоліками оцінки технічного стану за допомогою Ктг можна вважати наступні: оцінка відбувається тільки в момент перевірки, тобто відсутнє прогнозування стану; оцінка технічного стану не залежить від віку та пробігу АТ; оцінка технічного стану не відображує зміни ресурсу основних агрегатів АТ.

Із аналізу виконання завдань в зоні проведення АТО при використанні АТ підрозділами НГУ в умовах експлуатації що постійно змінюються можна сказати наступне: не завжди є можливість проведення планових ТО і Р; немає можливості визначити наскільки змінився технічний стан техніки, який її залишковий ресурс; визначити час та пробіг до чергової профілактики. Тобто, подальша зміна технічного стану не відображується в числових показниках коефіцієнта технічної готовності. Відсутність можливості оцінки технічного стану АТ, може негативно вплинути на її БГ і на хід виконання службово-бойових завдань (СБЗ) і привести до втрат особового складу та техніки.

Тому задача визначення дійсного технічного стану з урахуванням індивідуальних особливостей та умов експлуатації АТ є актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання оцінювання рівня технічної готовності АТ розглядаються у низці наукових праць, та керівних документів [1, 2]. Всі існуючі підходи з оцінки рівня технічної готовності АТ НГУ використовують виро-

бничий показник – коефіцієнт технічної готовності, який не враховує факторів, які можуть впливати на відновлення АТ.

В роботі [2] для оцінювання технічного стану АТ пропонується застосовувати комплексні показники надійності, такі як коефіцієнт оперативної готовності (Ког), коефіцієнт готовності (Кг), коефіцієнт технічного використання (Ктв), та ін., які включають в себе середній час відновлення (Тв), що зворотно пропорційний інтенсивності відновлення і також не враховує найбільш значущих факторів, від яких залежить час відновлення.

Ще один недолік існуючих методів оцінювання технічного стану у відповідності з [1] - використання середньостатистичних норм пробігів та працемістокостей на кожен конкретний автомобіль. Наприклад, в роботах [1, 3] приведені норми пробігу АТ та основних агрегатів до капітального ремонту, але не сказано, якому завантаженню автомобіля відповідають ці норми, та в яких умовах експлуатується автомобіль. Не враховуються також зміни в процесі експлуатації коефіцієнтів використання вантажопід'ємності та пробігу. В той же час дослідження [4-6] показують, що в залежності від завантаження та умов експлуатації пробіг автомобіля до технічного впливу може змінитись майже в два рази.

Передбачені для компенсації цього недоліку коефіцієнти не можуть повністю вирішити цього питання, адже вони не враховують всього багатоматіття умов експлуатації, та й самі умови для багатьох автомобілів не лишаються постійними навіть протягом одного робочого дня [7].

В роботах [8, 9] розглянуті основні питання підвищення надійності АТ, одержання об'єктивної діагностичної інформації для керування працездатністю машин та їх елементів, вибору моделюючих засобів діагностування.

Але всі розглянуті методи оцінювання зміни технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу АТ оптимальні лише в тому випадку, коли максимізується K_r АТ в залежності від його пробігу:

$$K_{\Gamma}(l) = \frac{M(U)}{M(U) + M(V)},$$

де $M(U)$ – математичне сподівання напрацювання між профілактиками;

$M(V)$ – математичне сподівання втрат пробігу за час простоїв.

Але при виконанні СБЗ АБТ НГУ доцільно було б враховувати готовність техніки під час проведення спеціальної операції. Таким показником може бути $K_{ог}$.

В роботі [15] запропонована математична модель, що на відміну від відомих більш повно оцінює зміни технічного стану АТ за рахунок:

- врахування оцінки технічного стану за допомогою $K_{ог}$.

- інтегрального показника, який враховує різноманіття факторів впливу на зміну технічного стану – сумарної витрати пального;

- використання регресійних залежностей середнього часу відновлення (профілактик) від експлуатаційних та ремонтно-обслуговуючих факторів.

В запропонованій математичній моделі коефіцієнт надлишку повітря вважається рівним 1. Але в дійсних умовах в двигуні кількість повітря що доводиться на 1 кг пального може бути більше або менше теоретично необхідного.

Отже, аналіз літературних джерел свідчить, що існуючі підходи до оцінювання зміни технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу орієнтовані на старі і малоефективні методи. А саме, технічний стан АБТ визначається за середньостатистичними показниками лише на момент перевірки та не дозволяє визначити ймовірність перебування зразка АТ в такому стані певний проміжок часу. Не враховується склад паливної суміші під час руху автомобіля.

Мета статті. Удосконалення математичної моделі зміни технічного стану АТ з урахуванням індивідуальних особливостей, умов експлуатації автомобільної техніки та впливу складу паливної суміші на рух автомобіля.

Основний матеріал

Якщо підрахувати вагову кількість повітря, що містить кількість кисню, достатню для повного згоряння 1 кг пального, то отримаємо, що для згоряння 1 кг бензину необхідно 14,7-15,0 кг повітря (в середньому 14,9 кг), для згоряння 1 кг дизельного пального 14,5 кг повітря, для згоряння 1 кг спирту 8,9 кг повітря, для згоряння 1 кг бензолу 13,2 кг повітря і т. д.

У дійсних умовах в двигуні кількість повітря, що припадає на 1 кг пального, може бути і більше і менше теоретично необхідного. Прийнято оцінювати даний склад горючої суміші порівнянням його з

такою сумішшю, в якій співвідношення повітря і пального рівне теоретично необхідному.

Співвідношення вагової кількості повітря, що припадає на 1 кг пального в дійсній суміші, до вагової кількості повітря, теоретично необхідного для повного згоряння 1 кг пального, називається коефіцієнтом надлишку повітря і позначається буквою α .

В залежності від складу паливну суміш називають:

- нормальною при $\alpha=1$;
- бідною при $\alpha>1$;
- багатують при $\alpha<1$.

Найбільша потужність двигуна отримується, якщо в суміші є деякий надлишок палива в порівнянні з теоретично необхідною його кількістю. Це пояснюється тим, що при $\alpha = 0,8-0,9$ відбувається найбільша швидкість згоряння суміші і тиск газів на поршень збільшується. Крім того, при певній неповноті згоряння палива обсяг продуктів згоряння збільшується і тиск газів на поршень додатково зростає.

Максимум економічності отримуємо при бідніших сумішах, ніж максимум потужності. Необхідність надлишку повітря в суміші в порівнянні з теоретично необхідною його кількістю пояснюється, з одного боку, недостатньою однорідністю суміші в циліндрі, що вимагає введення надлишкової кількості повітря, а з іншого - присутністю певної кількості відпрацьованих інертних газів, що залишаються в циліндрі.

В залежності від складу горючої суміші можливі два характерних режими роботи двигуна - режим максимальної потужності і режим найбільшої економічності. Горюча суміш, відповідна за складом першому режиму, називається потужністною, а відповідна другому - економічностною.

Для вирішення практичних завдань експлуатації зразків АТ, за основу використаємо математичну модель оцінювання зміни технічного стану запропоновану в роботі [15]. При визначенні ймовірності безвідмовної роботи автомобіля від сумарної витрати пального $P(Q_{\Sigma})$, склад паливної суміші вважався нормальним, тобто $\alpha=1$:

$$P(Q_{\Sigma}) = e^{-Q_{i\Sigma}/Q_{\Sigma\text{норм.}} \cdot \alpha},$$

$$\text{відповідно} \quad P(Q_{\Sigma}) = e^{-Q_{i\Sigma}/Q_{\Sigma\text{норм.}}},$$

де $Q_{i\Sigma}$ - поточна сумарна витрата пального за певний період;

$Q_{\Sigma\text{норм.}}$ - нормативна сумарна витрата пального/

В дійсності, під час роботи двигуна склад паливної суміші може змінюватися.

Так в дизелях коефіцієнт надлишку повітря завжди більший за 1 і в залежності від навантаження

змінюється від 1,3 до 5. В автомобілях з бензиновими двигунами коефіцієнт надлишку повітря знаходиться в діапазоні 0,43 – 1,33 при якому може відбуватися горіння паливної суміші.

З урахуванням вище сказаного, удосконалена математична модель оцінювання зміни технічного стану АТ буде мати такий вигляд:

Допущеннями даної моделі є такі:

Зміна технічного стану підпорядковується експоненціальному закону розподілу.

На періоді гарантійної експлуатації

$$P(Q_{\Sigma}) = 1.$$

Початкові умови:

$$\text{при } t = t_{\text{поч.експл.}} \quad P(Q_{\Sigma}) = 1;$$

$$t_{\text{проф}} \leq T_0;$$

$$T_{\text{ост}} \geq T_{\text{прог.операц}};$$

$$T_{\text{ост}} = t_{\text{проф}} - T_1;$$

$$K_{ог} = P(Q_{\Sigma}) \cdot K_g;$$

$$K_{ог}(Q_{\Sigma}) = P(Q_{\Sigma}) \cdot \frac{1}{1 + \lambda T_B} (1 + \lambda T_B e^{-\frac{1 + \lambda T_B}{T_B} t});$$

$$P(Q_{\Sigma}) = e^{-Q_{\Sigma} / Q_{\Sigma \text{норм.}}^{\alpha}};$$

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i;$$

$$n = L/100;$$

$$Q_i = \frac{\left((Kt - 0,3 \cdot 10^{-2} t)(Kh + 0,057 \cdot 10^{-3} H) \times \right.}{\eta_i} \left. \times [Ai_k + Bi_k^2 V_a + C(G_a \psi + 0,077 k F V_a^2)] \right);$$

$$A = \frac{7,95a V_h i_0}{H_n \rho_T r_k}; \quad B = \frac{0,69b V_h S_n i_0}{H_n \rho_T r_k^2};$$

$$C = \frac{100}{H_n \rho_T \eta_{тр}};$$

$$T_B =$$

$$= 46,125 - 7,375x_{e1} - 8,875x_{e2} - 0,125x_{e3} + 2,625x_{e1}x_{e2} + 2,875x_{e2}x_{e3} - 4,125x_{e1}x_{e2}x_{e3},$$

де $t_{\text{поч.експл.}}$ – час початку експлуатації;

$t_{\text{проф}}$ – час до проведення профілактики;

λ – інтенсивність відмов техніки;

T_0 – середній час безвідмовної роботи;

T_B – середній час відновлення [10 – 12];

t і H – відповідно температура повітря в градусах і висота над рівнем моря, м;

A , B і C – постійні для даного автомобіля коефіцієнти;

i_k – передавальне число коробки передач;

$G_a \psi$ – добуток ваги автомобіля в H і коефіцієнту сумарного опору дороги;

kF – фактор обтічності автомобіля, $\text{Hc}^2 \text{m}^{-2}$;

η_i – індикаторний ККД двигуна;

V_a – середня технічна швидкість, км/год;

$P(Q_{\Sigma})$ – ймовірність безвідмовної роботи;

α – коефіцієнт надлишку повітря в паливній суміші; Kt ,

Kh – відносні коефіцієнти зміни витрати пального в залежності від температури повітря та висоти над рівнем моря;

a , b – постійні коефіцієнти для кожного типу двигуна;

V_h – робочий об'єм циліндра, cm^3 ;

i_0 – передавальне число головної передачі;

H_n – нижча питома теплота згорання пального, кДж/кг;

ρ_T – щільність пального, г/см³;

r_k – радіус кочення колеса, м;

S_n – хід поршня, мм;

$\eta_{тр}$ – коефіцієнт корисної дії трансмісії;

L – протяжність маршруту.

Проведено аналіз залежності $K_{ог}$ від значень Q_{Σ} для різних значень загального напрацювання з урахуванням зміни коефіцієнту надлишку повітря в паливній суміші представлено на рис. 1.

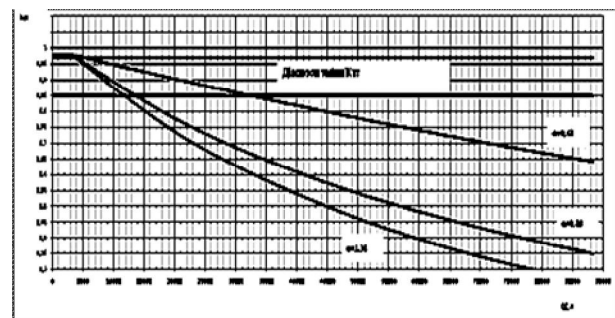


Рис. 1. Графік залежності $K_{ог}$ від Q_{Σ} для автомобіля ЗІЛ – 130 від початку експлуатації до КР з урахуванням зміни коефіцієнту надлишку повітря в паливній суміші

Із аналізу графіків можна зробити висновки:

1. Дійсне значення $K_{ог}$ лежить в межах діапазону, що відповідає коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 0,43 – 1,33$;

2. Кожному значенню Q_{Σ} відповідає декілька значень $K_{ог}$ в залежності від коефіцієнту надлишку повітря.

Висновки

За результатами проведених досліджень була удосконалена математична модель зміни технічного

стану та прогнозування остаточного ресурсу автомобільної техніки.

Для оцінки технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу автомобільної техніки запропоновано використання комплексного показника властивостей надійності безвідмовності та ремонтпридатності – коефіцієнта оперативної готовності, який враховує сумарну витрату пального за певний період та коефіцієнт надлишку повітря.

Це дозволяє визначати готовність автомобільної техніки з урахуванням середнього часу безвідмовної роботи і середнього часу відновлення та визначивши ймовірність безвідмовної роботи прогнозувати реальний технічний стан автомобільної техніки протягом певного терміну.

Список літератури

1. Про затвердження Порядку організації та експлуатації автомобільної техніки, іншого майна номенклатури автомобільної служби Національної гвардії України [Текст] / Наказ Командувача Національної Гвардії України від 27.12.2017 р. №900.
2. Форнальчик Є.Ю. Технічна експлуатація та надійність [Текст] / Є.Ю. Форнальчик, М.С. Олісевич, О.Л. Мاستикаш, Р.А. Пельо. – Львів.: Афіша. – 2004. – 125 с.
3. Говоруценко Н.Я. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / Н.Я. Говоруценко. - Х.: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984. – 312 с.
4. Карташов В.П. Организация технического обслуживания и ремонта автомобилей [Текст] / В.П. Карташов, В.М. Мальцев. - М.: Транспорт, 1979. – 215 с.
5. Говоруценко Н.Я. Экономическая кибернетика транспорта [Текст] / Н.Я. Говоруценко, В.Н. Варфоломеев. - Х.: РИО ХГАДТУ, 2000. – 218 с.
6. Кузнецов Е.С. Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта [Текст] / Е.С. Кузнецов – М.: Авто-трансиздат, 1964. – 54 с.
7. Варфоломеев В.Н. Научные основы построения и реализации технологии поддержания автомобилей в работоспособном состоянии на базе диагностической информации [Текст]: дис.... докт. техн. наук / В.Н. Варфоломеев. - Х., 1992. – 360 с.
8. Говоруценко Н.Я. Техническая кибернетика транспорта [Текст]: учебное пособие / Н.Я. Говоруценко, В.Н. Варфоломеев. - Х.: ХГАДТУ, 2001. – 271 с.
9. Говоруценко Н.Я. Системотехника проектирования транспортных машин [Текст]: учебное пособие - Изд. 3-е испр. и доп. / Н.Я. Говоруценко, А.Н. Туренко. - Х.: ХНАДУ, 2004. – 208 с.
10. Авдуевский В.С. Надежность и эффективность в технике [Текст]: справочник в 10 т. Том 2. Математические методы в теории надежности и эффективности / В.С. Авдуевский и др.. - М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
11. Авдуевский В.С. Надежность и эффективность в технике [Текст]: справочник в 10 т. Том 7. Качество и надежность в производстве / В.С. Авдуевский и др.. - М.: Машиностроение, 1989. – 280 с.
12. Анілович В.Я. Надійність машин в завданнях та прикладах [Текст] / В.Я. Анілович, О.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко. – Х.: Око, 2001. – 320 с.
13. Грушко И.М. Основы научных исследований [Текст] / И.М. Грушко, В.М. Сиденко – Х.: Вища школа, 1983. – 224 с.
14. Пахомов В.І. Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики [Текст]: учебный посібник / В.І. Пахомов, В.Г. Книгавко, О.В. Зайцева, В.С. Клименко, В.Г. Каліманов, М.А. Бондаренко. - Х.: Харк. мед. ін.-т., 1992. – 85 с.
15. Іванченко А.О. Удосконалення математичної моделі зміни технічного стану автобронетанкової техніки / І.К. Шаши, А.О. Іванченко, В.О. Темніков, І.В. Цебрюк // ХУПС: науковий журнал – Х.: Наука і техніка Повітряних Сил ЗСУ. – 2015. - № 4. - С. 138-142.

Надійшла до редколегії 26.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А.В. Ковтун, О.В. Иванченко, А.О. Иванченко, И.В. Бойков

В статье приводятся результаты исследования по совершенствованию математической модели изменения технического состояния автомобильной техники с учетом индивидуальных особенностей, условий эксплуатации автомобильной техники и влияния состава топливной смеси на работу двигателя.

Ключевые слова: техническое состояние, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технической готовности, закон распределения, условия эксплуатации.

IMPROVING THE MATHEMATICAL MODEL OF EVALUATION OF THE CHANGE OF THE TECHNICAL STATE OF AUTOMOTIVE EQUIPMENT

A. V. Kovtun, O. V. Ivanchenko, A. O. Ivanchenko, I. V. Boykov

The article presents the results of research on the improvement of the mathematical model of the change in the technical condition of automotive technology taking into account the individual characteristics, conditions of operation of automotive technology and the influence of the composition of the fuel mixture on the engine operation.

Keywords: technical condition, coefficient of operational readiness, coefficient of technical readiness, distribution law, operating conditions.

УДК514.853

Д.М. Нелюба, М.М. Гонтар

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІЮВАННЯ ПОВІТРЯ, ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

У статті розробляється математична модель системи опалення, вентиляції та кондиціювання, як об'єкта керування, придатної для подальшого використання при розробці автоматичних систем регулювання. Отримана нелінійна модель являє собою багатозв'язну систему з 6 входами і 8 виходами і може бути розкладена на 5 підсистем, які також є нелінійними системами.

Ключові слова: математична модель, опалення, вентиляція, кондиціювання повітря, СОВКП, HVAC.

Вступ

У країнах ЄС споживання енергії в будівлях становить близько 40% від загального споживання енергії, і зросло з 1974 більш ніж на 13% [1]. Споживання енергії сильно залежить від погодних умов. В залежності від географічного положення країни, більше половини цієї енергії може використовуватися для створення внутрішніх кліматичних умов. З технологічної точки зору, вважається, що застосування конкретних технологій, таких як Системи управління енергетикою приміщення (СУЕП, Building Energy Management Systems, BEMSs) може заощадити до 20% від споживання енергії в будівельному секторі, тобто 8% від загального споживання. СУЕБ, як правило, застосовується тільки для управління активними системами, тобто системами опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (СОВКП).

Дослідження, проведене в рамках проекту ALTENER [2] показав, що використання автоматичного управління для пасивних систем (наприклад, затінення або вільного охолодження) та її інтеграції в СУЕП може привести до значного зниження енергетичних втрат порівняно з затратами на управління

[3]. Таким чином, автоматичне управління має велике значення. Проте, системи управління в будівлях часто розробляються і налаштовуються за допомогою емпіричних правил, не завжди сумісних з вимогами до контрольованого обладнання, енергетичної ефективності та очікуваннями і попитом користувачів.

Основна частина

Розроблення точної моделі системи вентиляції та кондиціювання, необхідне для синтезу та аналізу роботи регулятора. СОВКП є досить складною (рис. 1). Вона складається з двох основних частин: повітряної і водяної підсистем. Ці підсистеми сходяться в теплообміннику (нагрівачі), де теплова енергія передається від води до повітря. Водяна підсистема складається з котла, водяного насоса, триходового регулятора витрат, труб, а також водонагрівальної спіралі. Повітряна підсистема складається з входу зовнішнього повітря, входу зворотного повітря, повітропроводів, вентилятора, змішувальної камери (включаючи повітряні заслінки зовнішнього і зворотного повітря) і повітряної частини теплообмінника. Регулятори потоку повітря і клапан потоку води мають пневматичний привод, що вимагає використання електропневматичних перетворювачів.

Важливо правильно вибрати відповідну форму моделі системи. Модель системи складається, наскільки це можливо, з моделей окремих компонентів або логічних груп компонентів (модулів). Так як модель повинна використовуватись для розробки регулятора, надзвичайно важливо, щоб вона точно враховувала стаціонарні і

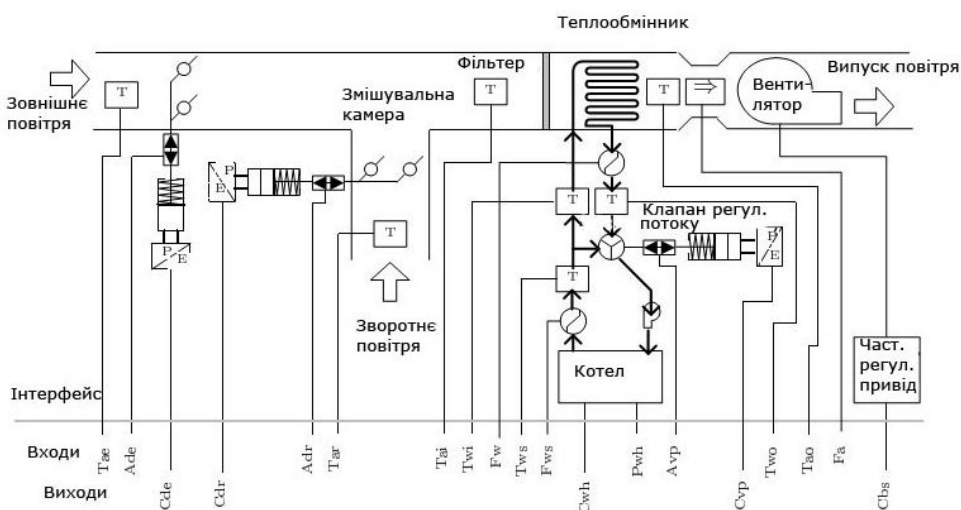


Рис. 1. Основні підсистеми функціональної моделі СОВКП

динамічні характеристики системи. Динаміка, пов'язана з датчиками, не змодельовувалась окремо, а була включена в динаміку системи в цілому. Враховуючи вищезазначене, модель розбита на п'ять підсистем (табл. 1).

Кожна модель підсистеми розроблена з використанням моделей її складових компонентів. Значна кількість змодельованих компонентів мають нелінійну стаціонарну поведінку. Ці нелінійні характеристики враховані в усіх змодельованих компонентах, за винятком теплообмінника. Моделювання динаміки теплообмінника є складною проблемою. Тому була розроблена його лінійна модель навколо робочої точки. В межах робочого діапазону введеного лінійною моделлю теплообмінника, динамічні характеристики компонентів точно представлені з використанням моделей першого порядку з транспортними затримками. Загальна модель СОВКП має шість входів (4 виходи регулятора і 2 входи збурень) та вісім виходів (виходи регулятора) (табл. 2, рис. 2).

Визначивши структуру моделі, виконана розробка моделей підсистеми.

Таблиця 1

Підсистеми з яких складається модель СОВКП

Підсистеми	Опис
Вентилятор	Відцентровий вентилятор зі змінною швидкістю обертання
Змішувальна камера	Повітряні заслінки зовнішнього і зворотного повітря і об'єм для змішування
Теплообмінник	Чотирихпрохідний спіральний
Клапан регулювання потоку	Тристоронній, рівнопропорційний, пневматичний клапан
Котел	Електричний водонагрівач з насосом з постійною подачею води

Таблиця 2

Входи і виходи експериментальної моделі СОВКП

Позн.	Призначення
<i>Входи</i>	
C _{vp}	Завдання положення клапана
C _{bs}	Завдання швидкості вентилятора
C _{dr}	Завдання положення зворотної повітр. заслінки
C _{wh}	Завдання споживаної потужності водонагрівача
T _{ar}	Температура повітря, що повертається
T _{ae}	Температура зовнішнього повітря
<i>Виходи</i>	
F _w	Швидкість потоку води через теплообмінник
F _{ws}	Швидкість потоку води через всю систему
F _a	Швидкість зворотного повітря через систему
T _{wo}	Температура води з теплообмінника
T _{ao}	Температура повітря з теплообмінника
T _{ai}	Температура повітря в теплообмінника
T _{wi}	Температура води в теплообмінника
T _{ws}	Температура води з котла

Подача повітря є перш за все функцією частоти обертання вентилятора, але також залежить від положення заслінки змішувальній камері. Таким чином вентилятор був змодельований як система 1x2, що має керований вхід швидкості вентилятора (C_{bs}) і кероване положення заслінки зворотного повітря

(C_{dr}) у якості входних величин і витрату повітря у якості вихідної величини. Модель вентилятора (рис. 3), містить 3 основні блоки: "c2Fa", "AdjFa2" і "Динаміка потоку". Вони моделюють зв'язок між керованою швидкістю вентилятора та подачею повітря, вплив заслінки на потік повітря і динаміку, зв'язану зі зміною потоку повітря, відповідно.

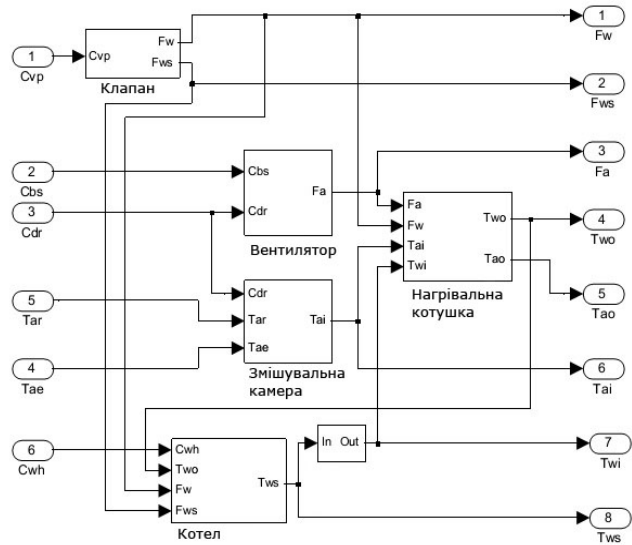


Рис. 2. Повна модель системи вентиляції та кондиціонування

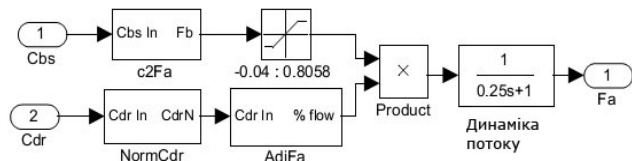


Рис. 3. Модель вентилятора

Математична модель вентилятора. Вентилятор являється основним компонентом у системі змінного об'єму повітря. Привід змінної частоти дозволяє змінювати швидкість вентилятора, змінюючи при цьому швидкість потоку повітря через систему. Зв'язок між керованою швидкістю вентилятора та потоком повітря не є лінійною функцією, тому що ефективність центробіжного вентилятора зменшується зі збільшенням швидкості потоку. Витрати повітря залежно від швидкості вентилятора описуються многочленом четвертого порядку [4]. Це рівняння реалізовано в моделі за допомогою блоку "c2Fa". Приймається, що зворотній клапан повністю відкритий (заслінка зовнішнього повітря повністю закрыта) і являє собою максимальний повітряний потік, доступний для будь-якої швидкості вентилятора.

$$F_a = 1,23 \cdot 10^{-8} C_{bs}^4 - 3,93 \cdot 10^{-8} C_{bs}^3 + 3,77 \cdot 10^{-4} C_{bs}^2 - 2,32 \cdot 10^{-3} C_{bs} - 1,67 \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

Позиція заслінки рециркуляційного/ зовнішнього повітря впливає на витрати. Заслінки з'єднані між собою, тому позиції обох визначаються сигналами

лом клапана управління (C_{dr}). Блок "AdjFa" прогнозує потік повітря, (як частку повітря, що подається з максимально можливого), в залежності від положення заслінки. Цей зв'язок є нелінійним і апроксимується за допомогою полінома 3-го порядку [5].

$$F_{a,adj} = -0,0233C_{dr}^3 - 0,0287C_{dr}^2 + 0,112C_{dr} + 0,933. \quad (2)$$

Загальна модель вентилятора сформована шляхом пропускання сигналу, отриманого множенням значення потоку повітря з блоку "c2Fa" з сигналом блоку корекції швидкості потоку, що залежить від положеннях заслінки (блок "AdjFa"), через блок, що представляє динаміку потоку повітря.

Математична модель змішувальної камери.

Змішувальна камера являє собою камеру у повітропроводі, перед нагрівальним елементом, з повітропроводами зовнішнього та зворотного повітря. Дросельні заслінки використовуються для зміни площі повітропроводів, тим самим керуючи співвідношенням зовнішнього і зворотного повітря, що виходить зі змішувальної камери. Хоча можна змінювати положення заслінок незалежно, в системах СОВКП вони зазвичай з'єднані між собою та діють скоординовано. В досліджуваній системі, зовнішні та зворотні повітря заслінки повітря з'єднані таким чином, щоб підтримувати постійне значення відкритої площі трубопроводу. Це дозволяє за допомогою заслінок варіювати співвідношення між зовнішнім і зворотним повітрям з невеликими відхиленнями в швидкості повітряного потоку.

Площа перетину заслінки варіюється шляхом обертання паралельних пластин. Хоча приводи заслінок є лінійними пристроями, перетворення поступального руху в обертаний забезпечується важелем, що призводить до нелінійної залежності між лінійними положенням приводу і кутом повороту пластин заслінки. Цей нелінійний зв'язок змодельований для заслінки зворотного повітря рівнянням [6]:

$$A_{dr} = -8,507 \cdot 10^{-7} C_{dr}^4 + 2,051 \cdot 10^{-4} C_{dr}^3 - 0,0172C_{dr}^2 + 1,5C_{dr} + 0,7028. \quad (3)$$

Заслінка зовнішнього повітря описується подібним перетворенням лінійного руху до обертального, але при переміщенні приводу заслінки вона змінює стан від повністю відкритого до повністю закритого. Положення поворотної заслінки зовнішнього повітря описується рівнянням [6]:

$$A_{de} = 1,219 \cdot 10^{-6} C_{de}^4 - 2,15 \cdot 10^{-4} C_{de}^3 - 0,0105C_{de}^2 + 0,8725C_{de} + 0,1232. \quad (4)$$

Лінійна залежність між заданими і фактичними позиціями [6]:

$$\hat{C}_{dr} = 6,197 \cdot 10^{-7} C_{dr}^4 - 1,61 \cdot 10^{-4} C_{dr}^3 + 0,015C_{dr}^2 + 0,5160C_{dr} - 0,1964 +$$

$$+0,015C_{dr}^2 + 0,5160C_{dr} - 0,1964. \quad (5)$$

$$\hat{C}_{de} = -1,3102 \cdot 10^{-6} C_{de}^4 + 2,279 \cdot 10^{-4} C_{de}^3 - 0,011C_{de}^2 + 1,1336C_{de} + 0,1208. \quad (6)$$

Після поправки на нелінійну залежність перетворення лінійного руху в обертаний у приводі заслінок зовнішнього і зворотного повітря, камера змішувача змодельована з урахуванням температури та співвідношення двох повітряних потоків і їх динаміки (рис. 4). Блок "NormCdr" відображає масштабування заданого сигналу повороту зворотної заслінки C_{dr} від діапазону напруги керування до діапазону [-1; 0] де -1 відповідає повністю відкритому положенню клапана рециркуляційного повітря. Оскільки заслінка зовнішнього повітряна "з'єднана" з заслінкою зворотного повітря, то нормалізована команда керування зворотної заслінки, \tilde{C}_{de} отримується за допомогою залежності $\tilde{C}_{de} = C_{dr} + 1$. В стаціонарному стані, температура повітря, що виходить з камери змішувача описується рівнянням

$$\tilde{T}_{ai} = (C_{dr} + 1)T_{ae} - C_{dr}T_{ar}. \quad (7)$$

Блок "Динаміка потоку" (рис. 5) використовується для отримання відповідної динаміки моделі.

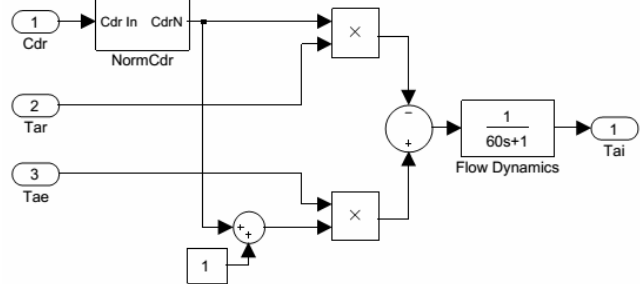


Рис. 4. Модель змішувальної камери

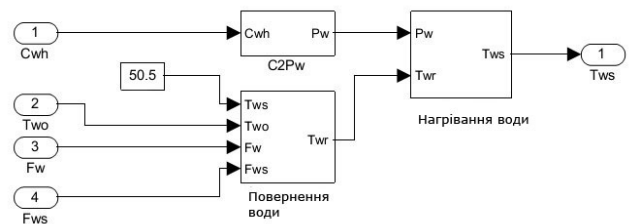


Рис. 5. Модель котла

Математична модель котла. Підсистема котла складається з електричного водонагрівача, керуваного перетворювача напруги (для зміни потужності, що підводиться до нагрівальних елементів) і водяного насоса з постійною подачею. Оскільки витрата води F_{ws} майже постійна, її вплив на температуру води на виході котла незначний. Таким чином, температура води з котла T_{ws} залежить від температури води, що повертається в котел, і потужності, що подається на нагрівач P_{ws} . Модель котла складається з трьох блоків (рис. 5). Блок "Повернен-

ня води" моделює температуру, що повертається в котел для нагрівання. Блок "C2Pw" моделює електричну потужність, що подається на нагрівач води, у відповідь на команду керування, що надходить на водонагрівача C_{wh} . Останній блок моделює водонагрівач, що нагріває повернену воду у відповідності до електричної потужності, що надходить. Динаміка котла також включена в цей блок.

Середня температура води, що повертається в котел, T_{wr} визначається співвідношенням і температурою води, що повертається з теплообмінника і тією, що повертається в обхід теплообмінника. Для розрахунку T_{wr} потрібно чотири параметри: швидкість потоку і температуру води що надходить до теплообмінника F_{ws} і T_{ws} , швидкість потоку і температура води, що надходить з теплообмінника F_w і T_{wo} . Блок "Повернення води" реалізує рівняння (8), що використовується для розрахунку температури води, що повертається в котел (рис. 6)

$$T_{wr} = \frac{T_{wo}F_w + (T_{ws} - 0,5)F_{ws}F_w}{F_{ws}} \quad (8)$$

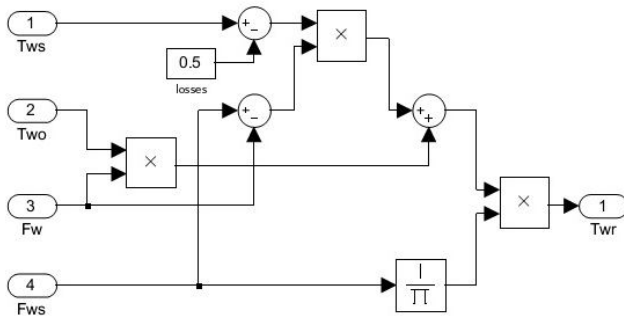


Рис. 6. Блок моделювання температури води, що повертається з котла

Завдання регулятора (напряга) C_{wh} використовується для зміни величини живлення змінного струму, що подається на нагрівач води. Це лінійна залежність визначається рівнянням (9) і реалізована у блоці "C2Pw" (рис. 7):

$$P_w = 4833,5C_{wh} - 2523,21 \quad (9)$$

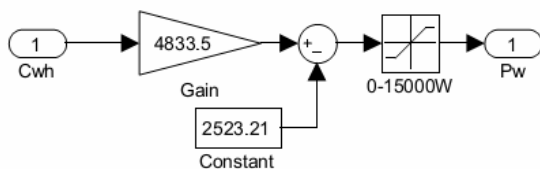


Рис. 7. Блок, що моделює перетворювача сигналу завдання у потужність

Використовуючи виходи попередніх двох блоків (T_{wr} і P_w) як виходи, блок "Нагрівання води" моделює температуру води на виході з котла (T_{ws}) (рис. 8). Електроенергія P_w , що подається на нагрівач води, нагріває воду, що повертається в котел (T_{wr}), підвищуючи її температуру у залежності від витрат води F_{ws} і підведеної потужності. Оскільки

витрати води через теплообмінник системи є майже незмінними, то вони прийняті постійними. Блок враховує як зростання стаціонарної температури у відповідності передавальної функції "TF" до потужності, що подається на нагрівач води P_w , так і динаміку виходу водонагрівача. Оскільки швидкість потоку води через водонагрівач є постійною, то постійна транспортна затримка є адекватною для моделювання переміщення води з входу водонагрівача на його вихід.

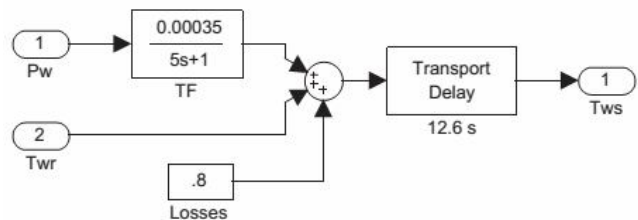


Рис. 8. Модель водонагрівача

Модель клапана керування потоком води. Тресторонній клапан управління потоком води рівнопропорційного типу має нелінійну залежність між положенням клапана і витратами води. Тресторонній клапан регулює витрати гарячої води, що йде на теплообмінник, повертаючи частину потоку назад в котел в обхід водонагрівача. Цей потік в поєднанні з водою, що повертається з теплообмінника, забезпечує достатньо "постійний" потік води через насос і котел. Клапан позиціюється за допомогою поршня і пневматичного приводу пружинного типу, оснащеного "реле позитивного позиціонування". Електропневматичний перетворювач використовується для управління пневматичним тиском, що прикладається до приводу пропорційно прикладеної напруги.

Модель клапаном управління потоком води, складається з п'яти каскадних блоків, що представляють потік води через нагрівальний елемент (F_w) і сумарний потік води через систему (F_{ws}) відповідно до зміни заданого положення управляючого клапана (рис. 9).

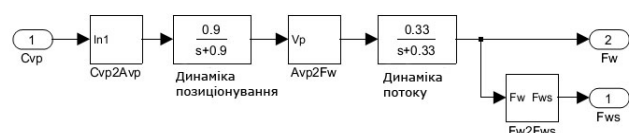


Рис. 9. Модель клапана керування потоком води

Перший блок, "Cvp2Avp", встановлює залежність між заданим положенням клапана та вимірним стаціонарним положенням клапана. Другий блок являє систему першого порядку, що представляє динаміку приводу. "Avp2Fw" зв'язує стаціонарний потік води та (фактичне) положення клапана. Це нелінійне співвідношення, що описується рівнянням полінома четвертого порядку.

$$F_w = 4,5 \cdot 10^{-6} A_{vp}^4 - 4,9 \cdot 10^{-12} A_{vp}^3 - 6,9 \cdot 10^{-8} A_{vp}^2 + 4,5 \cdot 10^{-6} A_{vp} - 7,78 \cdot 10^{-6} \quad (10)$$

Четвертий блок використовує систему першого порядку (з постійною часу $T \approx 0,066$ с), для перетворення динаміки води, що протікає через нагрівальний елемент. Теплообмінник створює більший опір потоку води, ніж обхідний ланцюг. Таким чином, загальна швидкість потоку води (що проходить через котушку і що проходить повз неї) змінюється залежно від положення клапана (або від потоку води через теплообмінник). Останній блок, "Fw2Fws", прогнозує сумарний потік води через систему (F_{ws}) залежно від потоку води через нагрівальний елемент. Для опису залежності використаний поліном третього порядку[7].

$$F_{ws} = -240966F_w^3 + 888,2F_w^2 - 0,539154F_w + 0,0006376 \quad (11)$$

Ці п'ять блоків, реалізовані з використанням Simulink, реалізують підсистему клапана.

Математична модель теплообмінника. Теплообмінник використовується в системі як чотирьохпрохідний теплообмінник вода-повітря з зустрічною течією. Передача теплової енергії від води до повітря залежить від фізичних властивостей теплообмінника і є функцією швидкості потоку і температур двох рідин (води і повітря). Залежності між входами виходами є нелінійними. Як згадувалося раніше, динамічне моделювання теплообмінника з зустрічною течією, особливо багатопрохідного типу, є досить складним. Тому використана лінійна модель в окрузі робочої точки [8]. Робоча точка (табл. 3) обрана таким чином, щоб забезпечити гарний робочий діапазон, досяжний у межах помірних температур.

Таблиця 3

Робоча точка лінійної моделі теплообмінника

T_{ai}	Температура повітря в теплообміннику	19,8°C
F_a	Швидкість зворотнього повітря через сист.	0,29 м ³ /с
T_{wi}	Температура води в теплообміннику	50°C
F_w	Швидкість потоку води через теплообмін.	0,0004 м ³ /с
T_{wo}	Температура води з теплообмінника	36,1°C
T_{ao}	Температура повітря з теплообмінника	40,8°C

Теплообмінник представлений у вигляді системи 2 x 4, що має чотири входи (табл. 3) і два виходи $-T_{ao}$, T_{wo} – температури повітря і води з теплообмінника, відповідно. Теплообмінник змодельований у вигляді двох підсистем 1x4, що мають ті ж самі чотири входи (рис. 10). Підсистема "Контур повітря" моделює температуру повітря з теплообмінника, а підсистема "Водяний контур" – температуру води з теплообмінника.

Підсистема "Водяний контур" (рис 10) моделює температуру води, що виходить з котушки, у залежності від чотирьох входів. Таким чином, "Во-

дяний контур" можна розглядати як представлення водяної частини нагрівального змійовика. Маса нагрівальної спіралі забезпечує теплоємністю, що викликає експоненційну (першого порядку) затримку виходу. Крім того, трубопровід нагрівача має довжину більше 14 метрів і, таким чином, має температурний градієнт, а також транспортну затримку. У моделі використовується середня температура на котушці, а затримки представлені у вигляді однієї транспортної затримки.

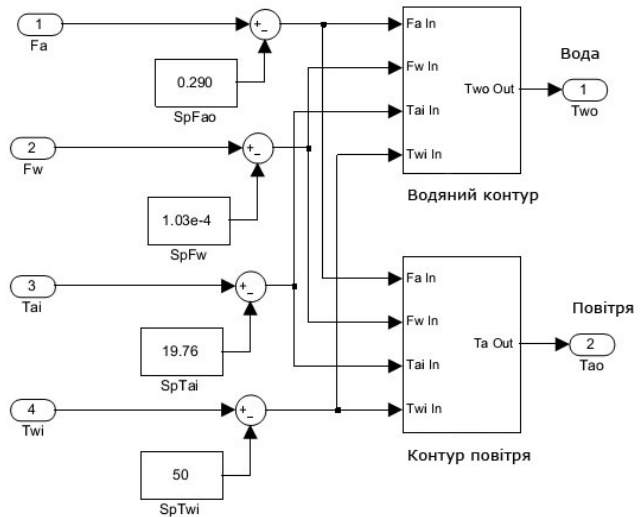


Рис. 10 – Математична модель теплообмінника

Кожен вхід теплообмінника має відповідну передавальну функцію, що зв'язує його з виходом. Для моделювання "водної" частини теплообмінника, використовуються чотири передавальні функції і чотири транспортні затримки, що з'єднані між собою і утворюють підсистему (рис. 11) [9].

$$TF_1 = T_{wo}(F_a) = \frac{-25,8}{30s + 1} \quad (12)$$

$$TF_2 = T_{wo}(F_w) = \frac{0,101}{30s + 1} \quad (13)$$

$$TF_3 = T_{wo}(T_{ai}) = \frac{0,4279}{s + 1} \quad (14)$$

$$TF_4 = T_{wo}(T_{wi}) = \frac{0,49}{25s + 1} \quad (15)$$

Підсистема "Контур повітря" (рис.12) моделює зміну температури повітря, що виходить з теплообмінника, залежно від чотирьох входів. Можна вважати, що ця підсистема представляє "повітряну" частину теплообмінника. Як і в підсистемі "Водяний контур", вона складається з чотирьох ланок затримки і передавальних функцій, зв'язаних між собою. Передавальні функції, що описуються рівняннями:

$$TF_1 = T_{ao}(F_a) = \frac{-30}{65s + 1} \quad (16)$$

$$TF_2 = T_{ao}(F_w) = \frac{0,05}{55s + 1} \quad (17)$$

$$TF_3 = T_{ao}(T_{ai}) = \frac{0,21}{4s+1}, \quad (18)$$

$$TF_4 = T_{ao}(T_{wi}) = \frac{0,79}{50s+1}. \quad (19)$$

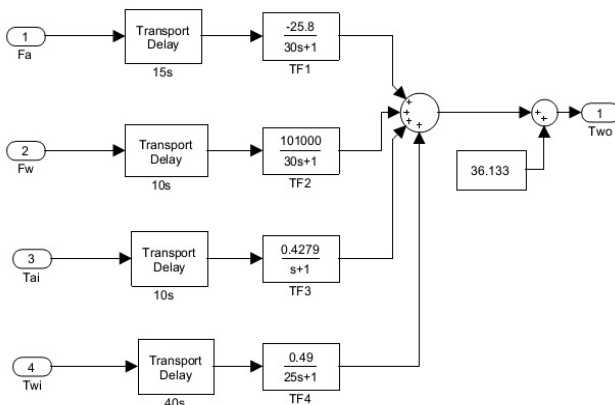


Рис. 11. Модель водяного контуру теплообмінника

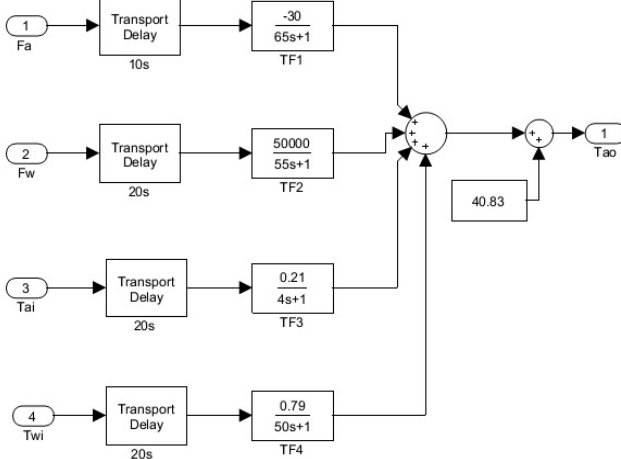


Рис. 12. Контур повітря теплообмінника

ВИСНОВКИ

Отримана математична модель системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря є нелінійною системою, яку умовно можна розбити на 5 підсистем, що теж є нелінійними.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ, КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Д.Н. Нелюба, М.Н. Гонтар

В статье разрабатывается математическая модель системы отопления, вентиляции и кондиционирования, как объекта управления, пригодной для дальнейшего использования при разработке автоматических систем регулирования. Полученная нелинейная модель является собой многосвязную систему с 6 входами и 8 выходами и может быть разложена на 5 подсистем, которые также являются нелинейными системами.

Ключевые слова: математическая модель, отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха, СОВКП.

HEATING, VENTILATING AND AIR CONDITIONING SYSTEM, AS PLANT, MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT

D.M. Neliuba, M.M. Hontar

The article discusses development of heating, ventilating and air conditioning system mathematical model, as plant, suitable for further use in automatic control systems development. The resulting nonlinear model is multiple input - multiple output system with 6 inputs and 8 outputs, and can be decomposed into 5 sub-systems, which are also non-linear systems.

Keywords: mathematical model, heating, ventilation, air conditioning, HVAC.

Отримані нелінійні математичні моделі підсистем СОВКП, дозволяють з достатньою точністю моделювати їх роботу як окремо, так і всієї системи в цілому.

Оскільки синтез автоматичних регуляторів для нелінійної системи є складною задачею, а параметри роботи СОВКП не значно змінюються протягом часу її роботи, в подальших дослідженнях доцільно виконати лінеаризацію моделей підсистем СОВКП та системи в цілому в околі робочої точки.

Список літератури

1. Benitez J.M. Fuzzy Control of HVAC Systems Optimized by Genetic Algorithms / J.M. Benitez, J. Casillas, O. Cordon, R. Perez. – Applied Intelligence 18, 2003. – Pp. 155–177.
2. Intelligent Energy - Europe (IEE) - ALTENER Projects (Renewable energy sources) <http://www.managenergy.net/resources/639>
3. Bruant M. Impact of a global control of bioclimatic buildings in terms of energy consumption and building's performance / M. Bruant, G. Guarracino, P. Michel, A. Voeltzel, M. Santamouris. – Proc. of the 4th European Conference on Solar Architecture and Urban Planning, Berlin, 1996. – Pp. 537–540.
4. Поляков В.В. Насосы и вентиляторы / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990 – 336 с.
5. Брусиловский И.В. Аэродинамический расчёт осевых вентиляторов / И.В. Брусиловский. – М.: Машиностроение, 1986. – 283 с.
6. Дзелзитис Э.Э. Управление системами кондиционирования воздуха: Справочное пособие / Э.Э. Дзелзитис. – М.: Стройиздат, 1990. – 176 с.
7. Кафаров В.В. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 368 с.
8. Богословский В.Н. Отопление / В.Н. Богословский, А.Н. Сканава. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.
9. Anderson M. MIMO Robust Control for Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems / M. Anderson, M. Buehner, P. Young, D. Hittle, C. Anderson, Tu Jilin, D. Hodgson // Control Systems Technology, IEEE Transactions on. – May 2008. – V. 16, I. 3. – P. 475-483.

Надійшла до редколегії 12.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

UDC 519.87

Yu.G. Podoshvelev¹, N.V. Ichanska²¹ *Poltava National V.G. Korolenko Pedagogical University*² *Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

MODEL OF CHEESE-OSIPOV-LANCASTER AND ITS GENERATION

The article considers models of the type of the Lanchester type and indicates the priority of their creation by M.P. Osipov. The analysis of application of these models to the research of social and economic systems is carried out. The generalization of the models of the Linchestan type by a system of equations is carried out and their classification, both in the multinational and in binary forms, is carried out. Equivalent classification models with precision to transformations are established.

Keywords: *lanchester models, priority, generalization, system, equivalence, phase portrait, conflicting pair.*

Introduction

Problem statement and analysis of recent researches and publications. It is known that as a result of the generalization of the accumulated experience and the natural evolution of science, a methodology for studying existing problems, both at micro and macro levels, is formed, based on a systematic approach. The use of the principle of systemicity includes, along with the quantitative and informative analysis of the investigated processes using the method of mathematical modeling, which is currently one of the most urgent areas in scientific research and allows: to explicitly describe the mechanisms of the functioning of processes and implement their prediction; replace the direct analysis of the main properties of phenomena by analyzing the properties and characteristics of mathematical models. The only difference in comparison with mathematical theory is that the consequences of axioms should not contradict empirical facts. Interesting is the philosophical question that needs a separate study on the reasons for the successful application of abstract concepts and theories to the description of the real world.

A powerful tool for scientific research is the deterministic mathematical model of objects, the carrier of a certain set of formal relations between parameters (external conditions and stable characteristics) and variables (the main characteristics, the analysis of which changes in values determines the main purpose of the modeling).

Scientists have made many attempts to simulate the military-economic antagonism of states with the help of ordinary differential equations [1 – 4]. Traditionally, the priority in creating a mathematical model of global armed confrontation was attributed to English mathematician F.V. Lanchester - a far-sighted genius, who during the First World War offered a mathematical model of air combat, during which the probable losses of aircraft opposing sides are proportional to the number of possible meetings. The simplest linear model of Lancaster has the form (7) (the formulas are in Table 1, 2), where $x = x(t)$, $y = y(t)$. Model (7) is used for battles in which the im-

pact is carried out for plane purposes. In the course of scientific research it became clear that the creator of the very first and most comprehensive models was Mikhail Pavlovich Osipov. The personality of Osipov is known to domestic mathematicians by the article "The Influence of the Number of Battle Parties on Their Loss" published in the Journal of the Military Collection in 1915, where the author published the Lanchester models for the year before most of Lancaster. Recently, in English literature, there has been a tendency for the transition from the phrase "model of Lancaster" to "Osipov-Lanchester model". The underlying cause was the article by R. Helmbold, published under the title "Osipov - Russian Lanchester" [5]. Now there is no question of the priority of a Russian scientist in publishing the first model of global armed confrontation. Identifying the personality of Mikhail Pavlovich Osipov was helped by the American J.Kipp, having published an article [6] in 2004.

At the beginning of the First World War, Osipov speaks of ways to achieve victory. For the first time in the history of wars, its victory is determined not by successful actions at the front, but by the one which the party does not exhaust its resources for a long time, first of all human. For the case of ground combat, when the enemy's losses occur as a result of direct contact at the anterior edge, Osipov proposed a model (10), where x and y are the number of two opposing armies, and the coefficients A and B show the effectiveness of the use of weapons.

We note that model (10) is more complete than the system of equations of Lanchester (7), since it takes into account the possibility of interaction of inhomogeneous forces. For the Osipov model, the following statement holds true: if necessary, to hold in r times stronger opponent, need to be armed with r^2 times more effective weapon than him.

The purpose of the work is to generalize the models of the Lanchester type by a single system of differential equations, and to classify them in the multinational and binary forms. Establishing equivalent classification models with accuracy up to transformations.

Presenting main material

The dynamics of social and economic systems is always difficult to simulate because of their unpredictability, and at the same time, these models are very valuable and useful, since they sometimes help to predict the future almost accurately and predict the effects of one or another action in advance. The most famous of these models was the model of English mathematician Lewis Fray Richardson proposed in 1918. This model was the first experience of using dynamic modeling in the field of international relations, which is amazing with its simplicity and certain truthfulness. Richardson used it to describe the arms race between Austria-Hungary and Germany on the one hand, and Russia and France on the other, during the pre-I World War (1909-1913 biennium). The general view of Richardson's model is as follows:

$$\begin{cases} \dot{x} = a_1x + a_2y + a; \\ \dot{y} = b_1x + b_2y + b, \end{cases} \quad (1)$$

where x and y are the levels of arms of the two countries, a_2 and b_1 – «coefficients of defense»; a_2 and b_2 – coefficients of cost of military effort (negative); a and b – the coefficients of "aggressiveness", express the degree of militarism (claims, if $a > 0$, $b > 0$) or the peacefulness of foreign policy (goodwill if $a < 0$, $b < 0$).

It is easy to see that the model (1) is a generalization of Osipov's model (10). It should also be noted that with (1) at $a = b = 0$ Morse-Kimbal model is a model of armed conflict with operational losses. According to Taylor, this model is acceptable in the following cases:

- there are significant non-military losses (illnesses, accidents, desertion and others, not caused by the direct influence of the enemy);
- there is a loss of combat, proportional to own strength (an offensive in the zone of damage by the factors of its own nuclear explosion that took place at the Totsky training artillery range of the Privolzhsky-Ural Military District);
- there is fire support (in the first approximation, it can be assumed to be proportional to the enemy's strength on the front edge).

Models of Osipov and Lancaster and their ideas have been repeatedly applied, as well as corrected. So, in his works, Tam Tam (Tam 1998), he modeled the Ardenian operation (December 15, 1944 - January 16, 1945), J. Engel (Engel 1954) - an operation on Ivadzhi, P. Morse and R. Kimbal (Morse, Kimball 1950) - the battle for the Atlantic, etc. Russian scientists are modeled Ice fight, Kulikov battle (Aleksiev 1988; Temeszhnikov 1988). The exceptional adequacy of the results obtained on the basis of models, corresponding to the historical data, is noted.

Model (8) describes the military confrontation of partisan forces with regular parts. It was developed by Brecken (1959) during the Vietnam War and generalized by V. M. Zakharov and GM Kurchinitsky in 2014

Party x is represented by guerrilla forces, and the party in - regular troops, which carry losses only in the ancestral region through the containment of partisans (attack block posts, sabotage actions, etc.), because they do not have reliable information about their dislocation and can control certain areas by bombing, aviation and rocket-artillery bombardments.

Analyzing the confrontation between the two superpowers in the Cold War, Peterson formulated a counteraction model (3), which, moreover, can be used to describe blockade and siege operations, which excludes any combat collision. In model (3), the number of victims is determined by its own number. This may be a model of the Cold War, when more of its submarines are fighting alert, the more they die.

The Lotka-Volterra model has the form (11), where $x(t)$ is the number of victims, $y(t)$ - the number of predators at time t , is structurally unstable. One of the reasons for the structural instability of the model is that it is conservative, that is, it has the first integral. Despite the main disadvantage of the model, the system of equations (11) allows us to draw non-trivial conclusions, confirmed by numerous observations. In particular, on the basis of (11) Volterra's principle is formulated: if in the "predator-victim" system both species are eliminated uniformly and in proportion to the number of their individuals, the average number of victims increases and the average number of predators decreases.

The model (18) proposed by J. Taylor in 1999 (75 years after the model (11)), to describe the hostilities, when the losses go, both at the forefront and as a result of the fire influence of the enemy in certain areas. It is established that the system (18) is replaced by the form (11) and vice versa. In the most general form, the classic Linux models for the two objects under study can be described by a system of differential equations:

$$\begin{cases} \dot{x} = a_{11}x^2 + a_{12}xy + a_{22}y^2 + a_1x + a_2y + a; \\ \dot{y} = b_{11}x^2 + b_{12}xy + b_{22}y^2 + b_1x + b_2y + b, \end{cases} \quad (2)$$

where a_{11} , a_{22} , b_{11} , b_{22} , – coefficients that have nonzero values in the "predator-victim" model and are a characteristic of the intraspecific competition of nature; a_{12} and b_{12} – the speed of losses due to the influence of plane targets; a_1 and b_1 – speed of non-hazardous losses; a_2 and b_2 – loss from the enemy's influence on the anterior edge; a i b – reserves.

The generalization of the image with a greater number of participants in the conflict:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij}^i x_j^2 + \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij+1}^i x_j x_{j+1} + a_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Classical Linux models used to describe a military confrontation are derived from system (2) both in the form of a monomer (see Table 1) and in the form of a binary (see Table 2) with $a_{11} = a_{22} = b_{11} = b_{22} = 0$.

Table 1

Classification of the Linchestrian models in a multinational form

$a = b = 0$	$a_{12} = a_2 = 0$	$a_1 = a_2 = 0$	$a_{12} = a_1 = 0$
$b_{12} = b_1 = 0$	$\begin{cases} \dot{x} = a_1x; \\ \dot{y} = b_2y. \end{cases}$ (3) Peterson 1953	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy; \\ \dot{y} = b_2y. \end{cases}$ (4)	$\begin{cases} \dot{x} = a_2y; \\ \dot{y} = b_2y. \end{cases}$ (5)
$b_1 = b_2 = 0$	$\begin{cases} \dot{x} = a_1x; \\ \dot{y} = b_{12}xy. \end{cases}$ (6)	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy; \\ \dot{y} = b_{12}xy. \end{cases}$ (7) Lanchester 1916	$\begin{cases} \dot{x} = a_2y; \\ \dot{y} = b_{12}xy. \end{cases}$ (8) Brecken 1959
$b_{12} = b_2 = 0$	$\begin{cases} \dot{x} = a_1x; \\ \dot{y} = b_1x. \end{cases}$ (9)	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy; \\ \dot{y} = b_1x. \end{cases}$ (8) Brecken 1959	$\begin{cases} \dot{x} = a_2y; \\ \dot{y} = b_1x. \end{cases}$ (10) Osipov 1915

Table 2

Classification of the London model in a binary form

$a = b = 0$	$a_2 = 0$	$a_{12} = 0$	$a_1 = 0$
$b_1 = 0$	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy + a_1x; \\ \dot{y} = b_{12}xy + b_2y. \end{cases}$ (11) Lotka 1924, Volterra 1926	$\begin{cases} \dot{x} = a_1x + a_2y; \\ \dot{y} = b_{12}xy + b_2y. \end{cases}$ (12)	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy + a_2y; \\ \dot{y} = b_{12}xy + b_2y. \end{cases}$ (13)
$b_{12} = 0$	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy + a_1x; \\ \dot{y} = b_1x + b_2y. \end{cases}$ (14)	$\begin{cases} \dot{x} = a_1x + a_2y; \\ \dot{y} = b_1x + b_2y. \end{cases}$ Morse-Kimball 1950	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy + a_2y; \\ \dot{y} = b_1x + b_2y. \end{cases}$ (15)
$b_2 = 0$	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy + a_1x; \\ \dot{y} = b_{12}xy + b_1x. \end{cases}$ (16)	$\begin{cases} \dot{x} = a_1x + a_2y; \\ \dot{y} = b_{12}xy + b_1x. \end{cases}$ (17)	$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy + a_2x; \\ \dot{y} = b_{12}xy + b_1y. \end{cases}$ (18) Taylor 1999

The systems (4), (6) and (5), (9) which are equivalent to the redefinition are not used as models, but their military content can be determined. Model (9), which is a reflection of a linear law, can be used, for example, to describe the confrontation between police forces and peaceful demonstrators. Both parties are losing solely due to the presence of arms in the party x and the perpetration of her violent actions.

The semi-logarithmic model (6) can be used, for example, to describe the actions of the occupation forces. In this case, the party y is completely disarmed (either by contract, or under the initial conditions when occupying the territory) and is losing proportionally to the number of contractions of the parties x and y . All losses on the part of x are related exclusively to the careless handling of the weapon.

The pair of systems (13) and (16) and the four (12), (14), (15) and (17) are equivalent because they are obtained from each other through transformations. The rest of the systems (12), (14), (15) and (17) are reduced by means of transformations into the system:

$$\begin{cases} \dot{u} = \alpha u + v + \beta; \\ \dot{v} = uv, \end{cases}$$

which is a partial case of a description of a mixed warfare model.

Consequently, from the foregoing follows the fact that from the binomial form of the Linchestrian models without a free member, the basis are: Lotki-Volterra, Morse-Kimbal, (12) and (13).

It should be noted that when conducting the classification of the system (2) by the structural elements of the right-hand side, the free members vanished. Nevertheless, they also find application in the models described in the literature. Thus, J. Engel used to describe the fighting at Iwadzim (one of the worst battles that lasted from February 16 to March 26, 1945, at the final phase of the Second World War in the Pacific Theater of War between the forces of the Japanese Empire and the United States for control of the island Ito) the following model:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -Ay + M; \\ \frac{dy}{dt} = -Bx + K. \end{cases}$$

In this case, x is Americans, constantly increasing their presence on the island, and y are Japanese, whose reserves were obstructed from the outside by the American blockade. As a result of hostilities, the Japanese garrison, totally 20,000 people, was completely exterminated. The American loss amounted to about 20 thousand people, of which about one fifth died. Since the American wounded were immediately evacuated from the battlefield, therefore, they were credited with irretrievable losses. Conversely, Japanese wounded were not evacuated and fought to complete destruction.

Enzel also conducted an investigation into the capture of Crete. Based on the model, it was found that

the combat effectiveness of the German troops was 6.5 times lower than the allies. And this despite the fact that the Germans participated in the elite parachute parts, and the Allies acted quite marshy in the battles ordinary land formation. Angezels model is the simplest generalization of the Osipov equations system, which reduces to (10) by transforming the shift by dependent variables.

Consider the models in the three-part form, which are a partial case of generalization (2), for which $a_{11}^2 + a_{22}^2 + b_{11}^2 + b_{22}^2 \neq 0$. One of these models is the model of mundialism - any kind of interconnected communication. This is a system of Lotka-Volterra equations with a logistic correction:

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha x^2 + a_{12}xy + a_{11}x; \\ \dot{y} = \alpha y^2 + b_{12}xy + b_{22}y. \end{cases}$$

is obtained from (2) at

$$a_{11} = b_{22} = \alpha, a_{22} = b_{11} = a_2 = b_1 = a = b = 0.$$

Its behavior of solutions in the vicinity of the stationary point changes the form of coefficients.

It is known that the important feature of biological systems is switching from one mode of operation to another. Example:

- sleep and wakefulness are different types of metabolism. Switching occurs periodically and synchronized with geophysical rhythm;

- in most insects, one and the same organism can exist in the form of caterpillars, puppets, butterflies. The switching occurs sequentially according to the genetic program;

- tissue differentiation - the cells are obtained by division from one type of cell, but later each performs its functions.

On a phase plane, the trigger system in the simplest case corresponds to two or more stable stationary solutions separated by separatrices. All special points (stable and saddle) lie at the intersection of the main isoquins - isozolines of vertical and horizontal tangents. In fig. 1 shows a relatively simple phase portrait of a critical system that describes the phenomenon of competition between two identical species. The corresponding system of equations is a partial case of the system of the Lotka-Volterra equations with a logistic correction:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x - xy - \delta x^2; \\ \frac{dy}{dt} = y - xy - \delta y^2, \end{cases}$$

at $a_{12} = b_{12} = -1, a_1 = b_2 = 1, \alpha = -\delta$.

This system has four stationary solutions:

- 1) $x = y = 0$ - unstable knot;
- 2) $x = y = 1/(1 + \delta)$ - saddle;
- 3) $x = 1/\delta, y = 0$ - stable knot;
- 4) $x = 0, y = 1/\delta$ - stable knot.

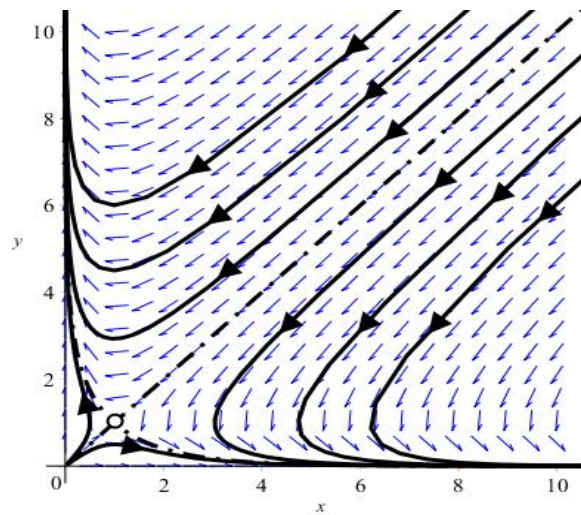


Fig. 1. A phase portrait of a critical system that describes the phenomenon of competition between two identical species

Suppose that pollution is in constant interaction with the surrounding environment, which has a purifying effect on pollution. We will also consider the system of "the environment - pollution" closed. Then the process of interaction with the environment can be described by the following system of equations:

$$\begin{cases} \dot{x} = a_{12}xy + a_1x + a; \\ \dot{y} = b_{12}xy + b_{22}y^2 + b_2y. \end{cases} \quad (19)$$

It is easy to see that the system of equations (19) is also a system of predator-victim, where the victim is contaminated (not a biological object), but as a predator, a biologically active environment.

Having replaced the variables in (19):

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1}{b_{12}}u, \quad y = \frac{a_1}{a_{12}}v, \quad \tau = -a_1, \\ \alpha &= -\frac{ab_{12}}{a_1^2}, \quad \beta = -\frac{b_2}{a_1}, \quad \gamma = \frac{b_{22}}{a_{12}}. \end{aligned}$$

we obtain the simplest mathematical model of the interaction of pollution with the environment in the form of a system:

$$\begin{cases} \dot{u} = \alpha - u - uv; \\ \dot{v} = \beta v - uv - \gamma v^2. \end{cases} \quad (20)$$

In the system (20) the parameter α can be interpreted as the generalized power of the source of pollution; β - maximum permissible concentration of pollution (if $u > \beta, \frac{dv}{dt} < 0$, and nature is dying out); γ - characteristic of the ecosystem - the coefficient of intraspecific competition in nature.

The position of equilibrium of the system of equations (20), corresponding to the conditions $\frac{du}{dt} = 0, \frac{dv}{dt} = 0$, it is easy to find from the equation $\alpha - u - uv = 0, \beta v - uv - \gamma v^2 = 0$. Then

$$A_1(\alpha, 0), A_2\left(\frac{\beta+\gamma+Q}{2}, \frac{\beta-\gamma-Q}{2\gamma}\right),$$

$$A_3\left(\frac{\beta+\gamma-Q}{2}, \frac{\beta-\gamma+Q}{2\gamma}\right), Q=\sqrt{(\beta+\gamma)^2-4\alpha\gamma}.$$

The second and third equilibrium positions exist, if $(\beta + \gamma)^2 - 4\alpha\gamma > 0$. Using the standard linear analysis for the stability of these positions of equilibrium, it is easy to obtain a parametric portrait of a system of equations. Note that the hierarchical approach can also be used for Lantern models (see Table 1). At the lower level, the Monte Carlo method simulates the interaction of individual combat units, on the average, the interaction is described by the Markov models, and on the upper (aggregated, deterministic) level, the differential equations of the type of the Lanchester type are used. Above these models, by introducing in them controlled parameters (the distribution of forces and means in time - the introduction of reserves, etc.), you can add management tasks in terms of controlled dynamic systems of differential equations.

Table 3

Hierarchical Model of Combat Action

Level	Modified phenomena, processes	Modeling machine
5	Distribution of forces in space	The game of Colonel Blotto and his modifications
4	Distribution of forces in time	Optimal control, repetitive games, etc.
3	Number dynamics	Equations of Lancaster and their modifications
2	"Local" interaction of divisions	Markov models
1	Interaction of individual combat units	Simulation simulation, Monte Carlo method

So, the Linux models can be used wherever there is a conflicting pair. Nobuo Taoka, founder of Tokyo Research Statistics Management Society, which in 1962 reorganized at different levels of the hierarchy of the London-based strategy in a model for capturing market share in business operations, is confirmed by this. As a result, Japan broke the American companies at that time in the competition for the share of the world market.

МОДЕЛЬ ЧЕЙЗА-ОСИПОВА-ЛАНЧЕСТЕРА ТА ЇЇ УЗАГАЛЬНЕННЯ

Ю.Г. Подошвелев, Н.В. Ічанська

У статті розглянуто моделі ланчестерського типу та зазначено пріоритет їх створення ученим М.П. Осиповим. Проведено аналіз застосувань даних моделей до дослідження соціально-економічних систем. Здійснено узагальнення моделей ланчестерського типу системою рівнянь та проведена їх класифікація, як в одночленній, так і в двочленній формах. Встановлено еквівалентні моделі класифікації з точністю до перетворень.

Ключові слова: ланчестерські моделі, пріоритет, узагальнення, система, еквівалентність, фазовий портрет, конфліктуюча пара.

МОДЕЛЬ ЧЕЙЗА-ОСИПОВА-ЛАНЧЕСТЕРА И ЕЕ ОБОБЩЕНИЯ

Ю.Г. Подошвелев, Н.В. Ичанская

В статье рассмотрены модели ланчестерского типа и указано приоритет их создания ученим М.П. Осиповым. Проведен анализ приложений данных моделей к исследованию социально-экономических систем. Осуществлено обобщение моделей ланчестерского типа системой уравнений и проведена их классификация, как в одночленной, так и в дво-членной формах. Установлено эквивалентные модели классификации с точностью до преобразований.

Ключевые слова: ланчестерские модели, приоритет, обобщение, система, эквивалентность, фазовый портрет, конфликтующая пара.

Conclusions

The article deals with the models of the Linchestrian type, which is a powerful tool for scientific research of deterministic mathematical models of objects, the carriers of a certain set of formal relations between parameters. The priority of their creation to MPs is highlighted. Osipov The analysis of application of these models to the research of social and economic systems is carried out.

The generalization of the models of the Linchestan type by a system of equations is carried out and their classification, both in the multinational and in binary forms, is carried out. Equivalent classification models with precision to transformations are established. For binomial forms of the Linchestrian models without a free member it is found that the basic ones are: Lotki-Volterra, Morse-Kimball.

An argumentative military interpretation of unused previously used models obtained as a result of generalization and classification has been given.

References

1. Mityukov NV Definition of victims of wars through the lanchester models // Historical psychology and sociology of data by the user from the point of view of the resonance / N.V. Mityukov – 2009. – №2. – С. 122–140.
2. Saati TL Mathematical Models of Conflict Situations / per. from english / T. L. Saati - M. : Soviet Radio, 1977. – 455 с.
3. Lanchester F. W. Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm. London: Constable and Co, Ltd, 1916.
4. Osipov M. P. The Influence of the Numerical Strength of Engaged Forces in Their Casualties / transl. by R. L. Helmbold, A. S. Rehm. Naval Research Logistics 42, 1995. P. 435–490.
5. Helmbold R. L. Osipov: the «Russian Lanchester». European Journal of Operations Research: 1993, vol. 65, no2, P. 278–288.
6. Kipp J. W. Tracking down Russia's Lanchester. Journal of Slavic Military Studies 17: 2004, P. 257–269.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, доц. О.В. Шульга, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

УДК 681.324

І.П. Саланда¹, О.В. Барабаш², А.П. Мусієнко³, Н.В. Лукова-Чуйко³¹ Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк² Державний університет телекомунікацій, Київ³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТРУКТУРИ РОЗГАЛУЖЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ 5 ПОКОЛІННЯ (5G) НА ОСНОВІ ВИПАДКОВИХ ГРАФІВ

В роботі розроблено математичну модель структури інформаційної мережі 5 покоління (5G) на основі теорії випадкових графів. Необхідність автоматичної реструктуризації мереж 5G в умовах підключення та відключення абонентських пристроїв, появи та зникнення ліній зв'язку під впливом перешкод та завад, призвела до того, що розроблена модель відрізняється від існуючих ймовірнісним характером множини зв'язків між елементами мережі, а також множини вузлів (елементів) мережі. Існуюча теорія функціональної стійкості на основі випадкових графів розроблена для обмеження, коли число вузлів мережі детерміновано, а число ліній зв'язку між вузлами є випадковим. В статті запропоновано математичну модель без обмежень на детермінованість множини вузлів мережі. Для оцінки рівня функціональної стійкості запропонованої моделі введено нові показники, які якісно відображають цю властивість та можуть достатньо ефективно обчислюватись.

Ключові слова: інформаційні мережі, функціональна стійкість, випадкові графи, мережі 5G.

Вступ

У наш час в якості інформаційних мереж підприємства доцільно використовувати сучасні та перспективні мережі 5 покоління (5G), які є безпроводними, динамічними, самоорганізуючими. До них постійно підключаються та вводяться абонентські пристрої, які не лише є кінцевими, а й виконують функції маршрутизаторів. У зв'язку з цим, дана мережа належить до типу стохастичних мереж. Такі мережі функціонують під впливом перешкод та завад.

Тому увесь час зникають та з'являються лінії зв'язку, підключаються та відключаються вузли. В таких умовах мережа має автоматично реструктуризуватись, самостійно налаштовуватись та забезпечувати стійке функціонування.

Дослідження існуючих науково-обґрунтованих підходів забезпечення стійкості функціонування складних технічних систем, до яких повною мірою відносяться й розгалужені інформаційні мережі (РІМ), дозволили зробити висновок про формування за останні роки нового пріоритетного підходу, що пов'язано із забезпеченням системі властивості функціональної стійкості (ФС).

Постановка наукового завдання. Забезпечення функціональної стійкості досягається застосуванням у складній технічній системі різних уже існуючих видів надмірності (структурної, часової, інформаційної, функціональної та ін.) шляхом перерозподілу ресурсів з метою парировання наслідків позаштатних ситуацій.

Разом з тим, нечисленні роботи в галузі забезпечення функціональної стійкості складних техніч-

них систем не дають змоги виробити єдині підходи та започаткувати теоретичні основи забезпечення функціональної стійкості для розгалужених інформаційних мереж.

Проблема полягає у відсутності підходу та відповідних моделей щодо опису структури сучасної розгалуженої інформаційної мережі підприємства на базі технологій 5G, параметрів її елементів та зв'язків.

Аналіз публікацій. Аналіз існуючої теорії функціональної стійкості показав, що у своїх роботах професор Машков О.А. [1] сформулював властивість функціональної стійкості й розробив загальну стратегію її забезпечення для складних технічних систем.

Послідовники наукової школи функціональної стійкості Барабаш О.В., Кравченко Ю.В., Кононов О.А., Неділько С.М., Обідін Д.М. та інші внесли вклад у розвиток понятійного апарату та вирішили проблему забезпечення функціональної стійкості для конкретних технічних систем, що наведено у працях [2, 3].

Особливості принципу роботи сучасних інформаційних мереж 5G дозволили зробити висновок про те, що, незважаючи на серйозні наукові результати теорії функціональної стійкості, досліджувані в них математичні моделі [4–6] не здатні адекватно описати процес функціонування розгалужених інформаційних мереж 5-го покоління.

Метою статті є розробка моделі структури розгалуженої інформаційної мережі 5-го покоління на основі теорії випадкових графів та графових перетворень.

Основна частина

Модель стохастичної інформаційної мережі

Випадкові графи є прийнятною математичною моделлю, що описує процеси в стохастичних інформаційних мережах, до яких належать сучасні мережі 5 покоління (5G). Використовується теоретико-графова термінологія із [7, 8].

Розглядаються графи без петель і кратних ребер. Якщо G – граф, то $V(G)$ позначає множину вершин, а $E(G)$ – множину ребер графа G . В тих випадках, коли це призводить до незрозумілості, замість $V(G)$ будемо використовувати позначення V_i замість $E(G) - E$. Якщо $V' \subseteq V$, $E' \subseteq E$, то $G-(V', E')$ позначає частину графа G , отриману в результаті видалення із G усіх ребер із E' всіх вершин із V' разом з інцидентними їм ребрами.

В якості стохастичної інформаційної мережі 5 покоління S_{mi} розглядаємо граф $G=(V, E)$, вершини якого відповідають вузлам комутації мережі S , а ребра – лініям зв'язку.

Вершина $x \in V$ і ребро $u \in E$ графа G інцидентні тоді і лише тоді, коли із вузла комутації, якому відповідає вершина x , виходить лінія зв'язку, яка відповідає ребру u . В подальшому, якщо це призводить до непорозумінь будемо говорити «інформаційна мережа», а не «стохастична інформаційна мережа 5 покоління».

Елементи інформаційної мережі S можуть виходити з ладу.

Припустимо, що елементи мережі S виходять з ладу випадковим чином і незалежно один від одного з деякими заданими ймовірностями.

Моделлю інформаційної мережі S з ненадійними елементами є випадковий граф (G, pv, pe) . Формально: нехай задано відображення $pv: V \rightarrow [0, 1]$ і $pe: E \rightarrow [0, 1]$.

Випадковим графом (G, pv, pe) називається випадкова величина ξ , значеннями якої є частини $G=(V', E')$ графа G , причому ймовірність того, що (G, pv, pe) набуде значення $G-(V', E')$, дорівнює

$$P_{\xi}((G, pv, pe) = G - (V', E')) = \prod_{w \in E'} pe(w) \times \prod_{w \in E \setminus E'} (1 - pe(w)) \prod_{y \in V'} pv(y) \prod_{y \in V \setminus V'} (1 - pv(y)). \quad (1)$$

Для кожного $y \in V$ параметр $pv(y)$ інтерпретується як ймовірність виходу з ладу (несправного стану) вузла мережі, якому відповідає вершина y . Аналогічно інтерпретується $pe(w)$ для $w \in E$.

Випадковий граф (G, pv, pe) можна трактувати як результат випадкового незалежного видалення вершин і ребер із графа G з ймовірностями pv та pe відповідно.

Якщо для всіх $y \in V$ параметр $pv(y)=0$, то такий випадковий граф будемо позначати (G, pe) , він від-

повідає інформаційній мережі, в якій вузли не виходять з ладу.

Аналогічно, якщо для всіх $w \in E$ параметр $pe(w)=0$, то такий випадковий граф будемо позначати (G, pv) .

Аналіз розробленої математичної моделі структури сучасної РІМ, а також існуючої теорії графів в цілому дозволяє зробити висновок про те, що оцінка рівня функціональної стійкості на отриманому графі пов'язана з певними труднощами. Це викликано тим, що існуюча теорія функціональної стійкості на основі випадкових графів розроблена для моделей з випадковим числом ребер і детермінованим числом вершин.

Проте, запропонована математична модель, крім випадкової кількості елементів множини ребер, характеризується також випадковою кількістю вершин, що дозволяє враховувати ймовірнісний вплив внутрішніх і зовнішніх факторів. У зв'язку з цим, доцільно ввести в розгляд нові показники функціональної стійкості.

Показники функціональної стійкості

1. Нехай на множині частин графа G визначена дійсна функція f .

Природнім чином визначається випадкова величина $f(G, pv, pe)$. Позначимо $Mf(G, pv, pe)$ – математичне сподівання цієї випадкової величини. Його можна інтерпретувати як деякий показник функціональної стійкості певної інформаційної мережі.

Розглянемо деякі конкретні показники ФС [9].

2. Якщо $V_1 \subseteq V$, то $PC(G, V_1)$ – ймовірність того, що у випадковому графі (G, pv, pe) усі вершини із V_1 поєднані (існує маршрут, що їх сполучає). Очевидно, що для цього показника функціональної стійкості функцію f потрібно визначити таким чином:

а) якщо H – зв'язна частина графа G , то

$$f(H) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } V_1 \subseteq V(H); \\ 0, & \text{якщо } V_1 \not\subseteq V(H); \end{cases}$$

б) якщо H_1, \dots, H_k – компоненти зв'язності частини H графа G , то $f(H) = f(H_1) + f(H_2) + \dots + f(H_k)$.

В тому випадку, коли $V_1 = V(G)$, будемо позначати цей показник ФС просто $PC(G)$.

3. Якщо $V_1 \subseteq V$, то $NPC(G, V_1)$ – математичне сподівання числа пар вершин із V_1 , поєднаних у випадковому графі (G, pv, pe) . Для цього показника функціональної стійкості функція f визначається наступними умовами:

а) якщо H зв'язна частина графа G , то

$$f(H) = \frac{1}{2} |V(H)| \times (|V(H)| - 1);$$

б) якщо H_1, \dots, H_k – компоненти зв'язності частини H графа G , то $f(H) = f(H_1) + f(H_2) + \dots + f(H_k)$.

Якщо $V_1=V$, будемо позначати цей показник ФС NPC(G).

4. Позначимо через NC(G) – математичне сподівання числа компонент зв'язності випадкового графа (G, pv, pe).

Для цього показника функціональної стійкості функція f визначається наступною умовою: якщо k число компонент зв'язності частини H графа G, то $f(H)=k$.

Обчислення показників функціональної стійкості

1. Перед тим, як перейти до обчислення показника ФС $Mf(G, pv, pe)$ зауважимо, що для нього виконуються такі умови:

а) для будь-яких зв'язних частин H_1, H_2 графа G, таких, що $V(H_1)=V(H_2)$, справедливо

$$f(H_1)=f(H_2);$$

б) якщо H_1, \dots, H_k – компоненти зв'язності частини H графа G, то

$$f(H)=f(H_1)+f(H_2)+\dots+f(H_k).$$

Нехай M – множина зв'язних підграфів графа G:

для $H \in M$, $O(H)$ означає множину вершин із $V \setminus V(H)$, суміжних з вершинами із H;

для $x \in O(H)$ $pe_H(x)$ – добуток усіх $pe(w)$, де $w=(x, t)$, $t \in V(H)$;

$PC(H)$ – ймовірність зв'язності випадкового графа (H, pv, pe), у якого ймовірність видалення елементів співпадає з ймовірностями видалення відповідних елементів в графі G[9].

Тоді показник функціональної стійкості $Mf(G, pv, pe)$ обчислюється за формулою, наведеною нижче:

$$Mf(G, pv, pe) = \sum_{H \in M} f(H) PC(H) (pe_H + pv - pe_H pv)^{O(H)}. \quad (2)$$

2. Слід зауважити, що формулою (2) можна користуватися в тому випадку, якщо попередньо вдасться знайти всі PC(H).

Розглянемо функції f_1, f_2, f_3 , які визначаються нижче:

$$f_1(H) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |V(H)| = |V(G)|, \text{ де } H - \text{ зв'язний}; \\ 0, & \text{в протилежному випадку}; \end{cases}$$

а) якщо H – зв'язна частина графа G, то можна розрахувати

$$f_2(H) = \begin{cases} \frac{|V(H)|}{|V(G)|}, & \text{якщо } |V(H)| < |V(G)|; \\ 0, & \text{якщо } |V(H)| = |V(G)|; \end{cases}$$

б) якщо H_1, \dots, H_k – компоненти зв'язності частини H графа G, то $f(H)=f(H_1)+f(H_2)+\dots+f(H_k)$.

Функція f_3 визначається сумою

$$f_3 = f_1 + f_2.$$

Легко бачити, що

$$Mf_1(G, pv, pe) = PC(G),$$

а для f_3 виконується така умова: якщо H – деяка частина графа G, то

$$f_3(H) = \frac{|V(H)|}{|V(G)|}.$$

Вершина у графа G існує з ймовірністю $pv(y)$, відповідно, математичне сподівання числа вершин у випадковому графі (G, pv, pe) дорівнює

$$\sum_{y \in V} (1 - pv(y)).$$

Таким чином,

$$Mf_3(G, pv, pe) = \frac{1}{|V(G)|} \sum_{y \in V} (1 - pv(y)).$$

Використовуючи рівності (2) та $f_1 = f_3 - f_2$, приходимо до виразу

$$PC(G) = \frac{1}{|V(G)|} \left(\sum_{y \in V} (1 - pv(y)) - \sum_{H \in M \setminus \{G\}} |V(H)| PC(H) (pe_H + pv - pe_H pv)^{O(H)} \right). \quad (3)$$

Обчислення PC(H) за цією формулою проводиться таким чином: для всіх 1-вершинних підграфів H графа G вважатимемо $PC(H) = (1 - pv)^{|V(H)|}$; потім обчислюємо PC(H) для 2-вершинних, 3-вершинних і т.д. під графів H графа G.

3. Розглянемо окремо формулу обчислення показника функціональної стійкості NPCV(G) для випадкового графа (G, pv), тобто для графа, який отримуємо в результаті випадкового видалення із графа G лише вершин:

$$NPCV(G) = \frac{1}{2} \sum_{y \in V} (1 - pv(y)) \sum_{\substack{z \in V \\ z \neq y}} (1 - pv(z)) - \frac{1}{2} \sum_{H \in M} |V(H)|^{O(H)} pv (1 - pv)^{|V(H)|} \times \sum_{y \in V \setminus O(H) \setminus V(H)} (1 - pv(y)). \quad (4)$$

Рівності (2)-(4) дозволяють обчислити значення введених показників функціональної стійкості.

Висновки

Дослідження процесу функціонування сучасних інформаційних мереж надали можливість розробити математичну модель РІМ 5 покоління, яка заснована на описанні структури випадковим графом.

В роботі введено нові показники, які якісно відображають властивість функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі, з одного боку, та достатньо ефективно обчислюванні – з іншого. Розроблено методи обчислення введених показників.

Необхідність автоматичної реструктуризації мереж 5G в умовах підключення та відключення абонентських пристроїв, а також врахування можливих позаштатних ситуацій, які обумовлені внутрішніми та зовнішніми чинниками, призвела до того, що запропонована модель відрізняється від існуючих ймовірнісним характером як множини зв'язків між елементами мережі, так і множини вузлів (елементів).

Існуюча теорія випадкових графів розроблена для випадків, коли кількість зв'язків мережі випадкова, а кількість вузлів детермінована.

Запропонована математична модель дозволяє при розробці теоретичних основ забезпечення функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж (в тому числі мереж 5G) синтезувати методики виявлення існуючого ресурсу (області надмірності) та методики оптимального використання надмірності.

Список літератури

1. Машков О.А. Топологічні критерії та показники функціональної стійкості складних ієрархічних систем / О.А. Машков, О.В. Барабаш // *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць*. – К.: ІПМЕ НАН України, 2003. – Вип. 25. – С. 29 – 35.

2. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.

3. Кравченко Ю.В. Функциональна стійкість – властивість складних технічних систем / Ю.В. Кравченко, О.В. Барабаш // *Збірник наукових праць НАОУ*. – К.: НАОУ, 2002. – Бюл. №40. – С. 225 – 229.

4. Кучук Г.А. Управление ресурсами инфотелекоммуникаций: монография / Г.А. Кучук, Р.П. Гахов, А.А. Пашичев. – М.: Физматлит, 2006. – 220 с.

5. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення: монографія / Г.А. Кучук. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил, 2013. – 264 с.

6. Неділько С.М. Математична модель структури автоматизованої системи управління повітряним рухом на основі випадкових графів / С.М. Неділько, Г.Л. Баранов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: НАУ “ХАІ”, 2011. – №8 (85). – С. 218 – 221.

7. Зыков А.А. Теория конечных графов / А.А. Зыков. – Новосибирск: Наука, 1969. – 354 с.

8. Колчин В.Ф. Случайные графы / В.Ф. Колчин. – М.: Физматлит, 2004. – 256 с.

9. Попков В.К. Математические модели живучести сетей связи / В.К. Попков. – Новосибирск: Вычислительный центр СО АН СССР, 1990. – 235 с.

Надійшла до редколегії 27.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Кравченко, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ 5 ПОКОЛЕНИЯ (5G) НА ОСНОВЕ СЛУЧАЙНЫХ ГРАФОВ

І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусиенко, Н.В. Лукова-Чуйко

Разработана математическая модель структуры информационной сети 5 поколения (5G) на основе теории случайных графов. Необходимость автоматической реструктуризации сетей 5G в условиях подключения и отключения абонентских устройств, появления и исчезновения линий связи под воздействием помех, привела к тому, что разработанная модель отличается от существующих вероятностным характером множества связей между элементами сети, а также множества узлов (элементов) сети. Существующая теория функциональной устойчивости на основе случайных графов разработана для ограничения, когда число узлов сети детерминировано, а число линий связи между узлами случайно. В статье предложена математическая модель без ограничений на детерминированность множества узлов сети. Для оценки уровня функциональной устойчивости предложенной модели введены новые показатели, которые качественно отражают это свойство и могут достаточно эффективно исчисляться.

Ключевые слова: информационные сети, функциональная устойчивость, случайные графы, сети 5G.

MATHEMATICAL MODEL OF THE STRUCTURE OF THE 5TH GENERATION (5G) BRANCHED INFORMATION NETWORK ON THE BASIS OF RANDOM GRAPHS

I.P. Salanda, O.V. Barabash, A.P. Musienko, N.V. Lukova-Chuyko

A mathematical model of the structure of the 5-generation information network (5G) is developed based on the theory of random graphs. The need for automatic restructuring of 5G networks in conditions of connection and disconnection of subscriber devices, the appearance and disappearance of communication links due to interference, has led to the fact that the developed model differs from the probabilistic nature of the set of connections between network elements, as well as the number of nodes (elements) of the network. The existing theory of functional stability based on random graphs is designed with limit, that the number of nodes of the network is deterministic, and the number of communication links between nodes is random. The article proposes a mathematical model without restrictions on the determinism of the set of nodes of the network. To assess the level of functional stability of the proposed model, new indicators have been introduced that qualitatively reflect this property and can be effectively calculated.

Keywords: information networks, functional stability, random graphs, 5G networks.

УДК 004.72

А.В. Собчук¹, М.О. Коваль¹, Ю.В. Кравченко¹, О.В. Барабаш²¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ² Державний університет телекомунікацій, Київ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНО СТІЙКОЇ БЕЗПРОВІДНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Запропоновано математичну модель функціонально стійкої безпроводної сенсорної мережі на основі показників зв'язаності мережі та обґрунтовано критерії функціональної стійкості. Досліджено критерії, що дозволяють управляти переналаштуванням системи, управляти надмірністю, динамічно змінювати таблиці маршрутизації у вузлах мережі, при виходу з ладу окремих сенсорів чи ліній зв'язку між ними, що допоможе в подальшому розраховувати раціональне розташування сенсорів на об'єкті.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, функціональна стійкість, оптимізація, показники зв'язаності.

Вступ

Сенсорна мережа являє собою розподілену систему автономних датчиків, що самоорганізуються в процесі роботи, а також використовують безпроводні канали зв'язку. За допомогою ретрансляції повідомлень між елементами мережі є можливою передача даних на доволі значну відстань. При цьому витрачаються досить незначні ресурси. Сенсорні мережі мають велику сферу застосування. Використання їх для моніторингу навколишнього середовища, на промислових об'єктах, охоронних системах, у військових чи медичних цілях дозволяє швидко ідентифікувати зміни спостережуваних показників, зібрати та обробити дані, що реєструються датчиками-сенсорами та передаються по мережі.

Сенсорні мережі доцільно використовувати в труднодоступних місцях, на об'єктах підвищеної небезпеки, в місцях переробки вибухових, хімічних, отруйних та інших речовин, де ремонт та технічне обслуговування системи датчиків є неможливим, затратним або небезпечним. Тому, до сенсорних мереж висувуються жорсткі вимоги щодо автономного функціонування в таких умовах.

Для забезпечення безперервного надійного функціонування сенсорної мережі в автономному режимі на тривалих термінах експлуатації пропонується забезпечити в системі властивість функціональної стійкості. В цьому випадку система буде нечутливою до зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих чинників, виконувати основні функції моніторингу зовнішнього середовища та передачі сукупності параметрів до центральної станції обробки і аналізу інформації.

Під функціональною стійкістю складної технічної системи розуміється її властивість зберігати протягом заданого терміну часу виконання своїх основних функцій в межах, що встановлено нормативними вимогами, в умовах впливу потоку відмов, несправностей, збоїв, навмисних пошкоджень тощо

[1] Забезпечення функціональної стійкості відбувається у три етапи:

- виявлення позаштатної ситуації;
- локалізація позаштатної ситуації;
- відновлення функціонування системи з обмеженими можливостями.

Постановка завдання в загальному вигляді.

Дослідження існуючих науково-обґрунтованих підходів підвищення ефективності функціонування бездротової сенсорної мережі та її компонентів показало, що не існує єдиного загального підходу до математичного опису даного типу мережі. Зазвичай, це пояснюється суб'єктивним характером процедури обрання моделі. Особливо це стосується підходів, що пов'язані із забезпеченням в системі властивості функціональної стійкості.

Реалізація функціональної стійкості досягається застосуванням у складній технічній системі різних уже існуючих видів надмірності (структурної, часової, інформаційної, функціональної, навантажувальної та ін.) шляхом перерозподілу ресурсів з метою паритету наслідків позаштатних ситуацій [2]. В той же час більш детальної уваги потребує завдання розробки математичної моделі сенсорної бездротової мережі із властивістю функціональної стійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Роботами, пов'язаними з математичним описом сенсорних мереж та їх компонентів займалися такі вчені, як Беркман Л.Н. [3], Галкін П.В. [4], Машков О.А. [5], Барабаш О.В. [6], Кравченко Ю.В. [6], Обідін Д.М. [7], Шмід С. [8], Джигу Ю. [9], Льюїс П. [10], Іванова І.А., Зеленін А.Н., Власова В.А., Ефремов С.Г., Галенюка І.Б., Євтух Г.С., Карпінський В.М., Лі Дж., Мун І., Парк П., Вонг Х., Ву Н. та інші. На сьогоднішній день теорія функціональної стійкості розвивається в наукових роботах Машкова О.А. [11], Барабаша О.В. [12], Кравченка Ю.В. [5], Савченка В.А., Обідіна Д.М., Мусієнка А.П. та інших. В них розробляються наукові методи і способи забез-

печення функціональної стійкості різних типів технічних систем. При цьому слід зазначити, що найбільш доцільно розробляти та впроваджувати методи забезпечення функціональної стійкості для інтелектуальних багатомодульних систем, до класу яких і відноситься сенсорні мережі. В такій системі кожний датчик може замінити датчик, який вийшов з ладу з урахуванням радіусу дії та інших параметрів. Тому на сьогодні є актуальними питання розробки методів управління надмірністю в процесі деградації системи протягом її автономного функціонування на тривалих термінах експлуатації.

На даний час в теорії функціональної стійкості розроблено математичні моделі складних технічних систем, які не в повній мірі можуть описати функціонування всіх існуючих систем. Актуальним є завдання узагальнити теорію функціональної стійкості складних технічних систем та розвивати її для конкретних систем. Аналіз відомих наукових положень існуючої теорії функціональної стійкості виявив що, вперше у [3] було сформульовано та доведено загальну відмінність стійкості функціонування від функціональної стійкості: стійкість функціонування характеризує поведінку координат незбуреного й збуреного руху системи, а функціональна стійкість характеризує відхилення основних функцій системи під час впливу на неї зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. Розподілена інформаційна система математично описана випадковим графом, вершини якого з'єднані за принципом трикутника. За такого підходу при більшості позаштатних ситуацій інформація від кожного вузла повинна дійти (нехай і не по найкоротшому шляху) до кожного вузла системи.

В [7] надано формалізоване визначення функціональної стійкості псевдосупутникової радіонавігаційної системи. На відміну від розподіленої інформаційної системи у псевдосупутниковій системі моделлю з'єднань є топологія мережі «Зірка», а математичною моделлю – навантажені орграфи. Проблема синтезу структури системи вирішена на основі теорії матроїдів, градієнтних алгоритмів і розробленого автором методу послідовного збільшення рангу k-однорідного матроїда.

На відміну від відомих, математична модель сенсорної мережі має описувати структуру мережі, особливості бездротових ліній зв'язку між сенсорами, динаміку їх зміни й переналаштування, а також має враховувати можливість управління надмірністю для забезпечення властивості функціональної стійкості.

Метою статті є розробка математичної моделі бездротової сенсорної мережі та дослідження загальних принципів взаємодії окремих її елементів, а також пошук шляхів підвищення функціональної стійкості даного типу мережі.

Основна частина

Сенсорні мережі призначені для збирання інформації про параметри середовища, складаються із великого числа сенсорів, що розкидаються в хаотичному порядку на заданій території. Кожний сенсор мережі виконує три функції: 1) функцію датчика – вимірює відповідні параметри навколишнього середовища; 2) функцію передатчика – передає накопичену інформацію до адресату, яким є один із найближчих сенсорів; 3) функцію маршрутизатора – приймає від сусідніх сенсорів інформаційні пакети та передає їх по мережі в сторону спеціального пункту прийому інформації, на якому вся інформація аналізується, зберігається, обробляється та надається зацікавленим особам у зручному вигляді.

Особливістю є те, що зв'язок між сенсорами бездротовий – вся сенсорна система в залежності від алгоритмів управління маршрутизаторами (сенсорами) має властивість самоорганізації (пошук нових маршрутів передачі інформації замість пошкоджених та уражених).

Для забезпечення функціонування запропонованої сенсорної мережі необхідно забезпечити її функціональну стійкість. Традиційно це робиться у три етапи: виявлення, локалізація, використання надмірності для відключення несправних сенсорів та передачі функцій тим, що залишилися справними.

Індивідуальні характеристики сенсорних мереж описуються таким набором параметрів як: кількість вузлів в мережі, швидкість передачі даних по каналах зв'язку, щільність розміщення вузлів, час роботи мережі, пропускна здатність вузлів, діаметр мережі. Залежно від завдань, покладених на сенсорну мережу, буде відрізнятися і її топологія. Розглянемо безпроводну сенсорну мережу моніторингу певного об'єкту, що буде збирати дані та надсилати їх для обробки до локальної станції. Вона буде мати таку топологію (рис. 1).

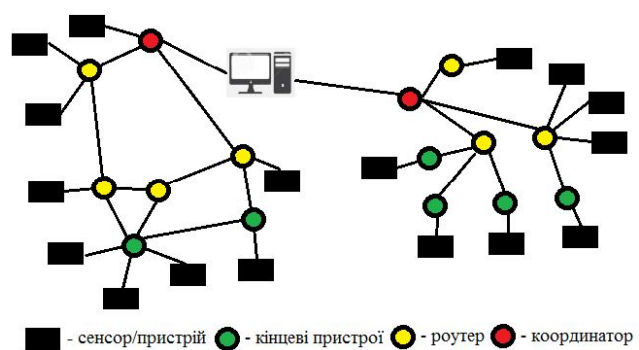


Рис.1. Топологія безпроводної сенсорної мережі моніторингу

Представимо дану сенсорну мережу як граф $G = [V, R]$, де $V = [V_1, V_2, \dots, V_n]$ – множина вузлів мережі; $R = [R_1, R_2, \dots, R_m]$ – множина ребер.

Зазвичай в сенсорній мережі призначають один або кілька вузлів в якості керуючих, який (або які) збирає (збирають) дані з усієї мережі, а також може (або можуть) керувати і / або конфігурувати її вузли. В якості керуючого критерію може використовуватися можливість зміни максимальної потужності радіопередачі кожного конкретного вузла.

Структура графу сенсорної локальної мережі визначається тим, наскільки досяжним є зв'язок будь-якого вузла мережі з будь-яким іншим. Структуру зв'язків можна описати за допомогою матриці:

$$A = \{a_{ij}\}_{n \times n} \quad (1)$$

де a_{ij} – можливість передачі повідомлення від елемента i до j . В якості значень елементів a_{ij} можуть вибиратися значення, пропорційні ефективній швидкості передачі даних, яка визначається кількістю переданих пакетів за одиницю часу або втрачених пакетів, які зажадали повторної передачі за цей самий проміжок часу. Беручи до уваги, що безпроводна сенсорна мережа складається з кінцевих пристроїв, роутерів і координаторів, множину пристроїв мережі можна розбити на три підмножини, що об'єднують всі елементи сенсорної мережі:

$$N \subset K, N \subset R, N \subset E, \quad (2)$$

де K – підмножина координаторів в мережі; R – підмножина роутерів в мережі; E – підмножина кінцевих пристроїв в мережі. Тоді загальну кількість вузлів в мережі можна описати, як:

$$N_{all} = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{j=1}^k N_j + \sum_{l=1}^r N_l + \sum_{s=1}^e N_s, \quad (3)$$

де k – кількість координаторів в мережі; r – кількість роутерів в мережі; e – кількість кінцевих пристроїв в мережі; N_j – j -й координатор в безпроводній сенсорній мережі; N_l – l -й роутер мережі; N_s – s -й кінцевий вузол мережі.

Нехай максимальна відстань між N_i і N_j , де N_i знаходиться в радіовидимості N_j , називається радіусом зв'язку R_{radio} вузла N_i , і визначає зв'язаність вузла безпроводної сенсорної мережі (рис. 2). Вузли N_i і N_j можуть мати прямий радіозв'язок тоді і тільки тоді, коли [12]:

$$N_i \in M_Radio(N_j) \cap N_j \in M_Radio(N_i) \quad (4)$$

де $M_Radio(N_j)$ – множина сусідів радіозв'язку.

В такому випадку два вузли називаються сусідами, якщо перетини їх радіусів дії не являється пустою множиною:

$$R_s(N_i) \cap R_s(N_j) \neq \emptyset, \quad (5)$$

де $R_s(N_i)$ – радіус дії сенсорного вузла N_i ; $R_s(N_j)$ – радіус дії сенсорного вузла N_j для усіх $i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$.

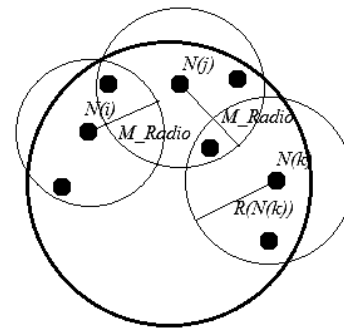


Рис. 2. Зона радіовидимості вузлів сенсорної мережі [11]

Одним із основних критеріїв функціонування безпроводної сенсорної мережі є період її якісної роботи. В ситуаціях коли необхідно забезпечити постійний моніторинг, такий як, моніторинг та контроль промислових процесів, моніторинг стану виробничих об'єктів або навколишнього середовища. В такому випадку одним з головних критеріїв функціонування сенсорної мережі є енергоспоживання кожного з її компонентів, для забезпечення тривалого автономного та безперебійного якісного функціонування сенсорної мережі.

Якщо описувати бездротову сенсорну мережу орієнтованим графом варто зазначити, що важливу роль грає пошук найкоротшого маршруту передачі даних між вузлами та компонентами мережі. Кожен вузол мережі споживає енергію з постійною швидкістю при його взаємодії з іншими вузлами. Тому енергоспоживання можна умовно розділити, на використання в режимі очікування та під час передачі/прийому інформації між вузлами.

Припустимо, що усі вузли мають однаковий заряд енергії і витрачають ідентичний відсоток заряду на передачу та прийом даних.

Метою, в такому випадку, є мінімізація суми споживаної енергії під час більш активної фази енергоспоживання.

Опишемо функцію, що мінімізує суму загальної спожитої енергії, в усіх вузлах, як [6]:

$$\text{MIN} \sum_{i \in N} e_{i0} - \sum_{i \in N, i \neq n} E_{i(et)}, \quad (6)$$

де e_{i0} – початковий показник енергії вузла i для усіх $i \in N (e_{i0} > 0)$; $E_{i(et)}$ – показник енергії вузла i в період часу t для усіх $i \in N, t \in T$; i, j, k – індекси вузлів мережі. За умови, що:

$$\sum_{i \in N, i \neq k} X_{ikt} - \sum_{j \in N, j \neq k} X_{kjt} = 0, \quad (7)$$

для усіх $i, k \in N, t \in T, k \neq s, k \neq n$, де X_{ikt} – показник стану мережі, якому відповідає 1, якщо вузол i та j пов'язані в період часу t ; 0 в іншому випадку для всіх $i, j \in N$; s – індекс вузла джерела передачі інформації.

$$X_{ijt} + X_{jit} \leq 1 \quad \forall i, j \in N, t \in T, i \neq j; \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq s} X_{sjt} = 1 \quad \forall t \in T; \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq n} X_{int} = 1 \quad \forall j \in N, t \in T; \quad (10)$$

$$d_{ij} \cdot X_{ijt} \leq ld, \quad \forall i, j \in N, t \in T, \quad (11)$$

де d_{ij} – відстань між вузлами i та j для усіх $i, j \in N$.

$$E_{it} - E_{it-1} + cw \cdot \sum_{j \in N, i \neq j} X_{ijt} + ct \cdot \sum_{j \in N, i \neq j} d_{ij} \cdot X_{ijt} = 0, \quad (12)$$

$\forall j \in N, i \neq n, t \in T$, де cw – енергія спожита вузлом під час його активації для прийому чи передачі даних; ct – швидкість споживання енергії під час передачі чи прийому даних (константа);

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N \quad (13)$$

$$E_{it} \geq 0, \quad \forall i \in N, t \in T. \quad (14)$$

Для повної оцінки сенсорної мережі з точки зору теорії функціональної стійкості слід розглядати критерії зв'язності мережі. Так як реалізація функціональної стійкості досягається застосуванням у складних технічних системах різних, уже існуючих видів надмірності (функціональної, структурної, часової, інформаційної та ін.), необхідно забезпечити перерозподіл ресурсів мережі, для її безперерйного функціонування. Вибір характеристик зв'язаності визначається твкими обставинами:

- існуючими показниками функціональної стійкості;
- класифікацією характеристик зв'язаності.

В даному випадку слід розглядати мережу, яка після видалення k сенсорів зберігають задану зв'язаність, крім одиночного околу видалених вузлів. Теорія функціональної стійкості розглядає такі показники структури, як:

1. Число вершинної зв'язності $\chi(G)$ – це найменше число вершин, віддалення яких разом з інцидентними їм ребрам призводить до незв'язного чи одностороннього графу.

2. Число реберної зв'язності $\lambda(G)$ – це найменше число ребер, віддалення яких призводить до незв'язного графу.

3. Імовірність зв'язності $P_{ij}(t)$ – це імовірність того, що повідомлення із вузла i у вузол j буде передано за час не більший, ніж t .

Аналіз даних показників дозволяє виділити наступні особливості:

- числа вершинної та реберної зв'язності характеризують тільки поточну структуру, незалежно від надійності вузлів комутації або ліній зв'язку;

- імовірність зв'язності $P_{ij}(t)$ дозволяє враховувати надійність обладнання, вид фізичного каналу передачі інформації, наявність резервних каналів та маршрутів, а також зв'язність структури;

- імовірність зв'язності характеризує тільки зв'язність між однією парою вершин. Для того щоб

оперувати між всіма парами вершин необхідно оперувати з матрицею ймовірностей зв'язності [13]:

$$P = \|P_{ij}\|, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

Узагальнений ймовірнісний показник зв'язності P_{ij} також можна представити, як згортку матриці ймовірностей зв'язаності:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & 0 & & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Дослідивши значення вагових коефіцієнтів можна визначити інтенсивність передачі інформації, яка описується формулою:

$$F(P_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} * P_{ij}, \quad (17)$$

де n – число вузлів мережі; w_{ij} – вагові коефіцієнти лінії зв'язку, які залежать від заданої передачі інформації p_{ij} між v_i і v_j .

Математичне сподівання заданої інтенсивності передачі інформації $M[p]$ для сенсорної мережі визначається на основі такої залежності:

$$w_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{при } p_{ij} \geq M[p]; \\ 1, & \text{при } 0,1M[p] \leq p_{ij} < M[p]; \\ 1/2, & \text{при } p_{ij} < M[p], \end{cases} \quad (18)$$

де
$$M[p] = (1/n \cdot (n-1)) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n p_{ij}. \quad (19)$$

На основі запропонованих ознак та показників обґрунтовано критерії функціональної стійкості:

1. Структурний критерій. За умови, що число вершинної зв'язності та число реберної зв'язності задовольняють вимогам:

$$\chi(G) \geq 2 \cup \lambda(G) \geq 2 \quad (20)$$

2. Імовірнісний критерій. Імовірність зв'язності між кожною парою вершин має бути не менше заданої:

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^3, \quad i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (21)$$

Для прикладу представимо граф $\chi(G)$ на рис. 3. При цьому допускається, що у всій розподіленій системі можливий вихід з ладу будь-яких сенсорів, за яких мережа залишається зв'язаною [12].

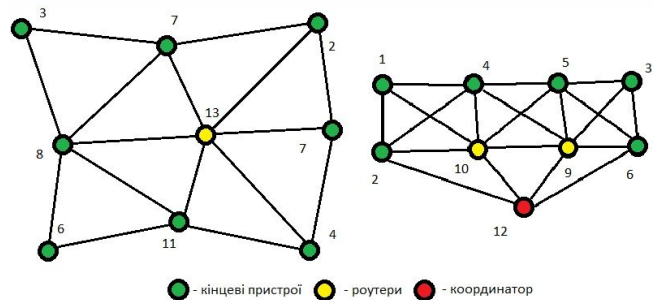


Рис. 3. Приклади функціонально стійких структур

На рис. 3 відображено графову модель функціонально стійкої структури. Після розриву ребра, число вершинної зв'язності для графу знизиться, як і число допустимих відмов.

Запропоновані критерії дозволяють управляти перенаштуванням системи, управляти надмірністю, динамічно змінювати таблиці маршрутизації у вузлах мережі, при виходу з ладу окремих сенсорів чи ліній зв'язку між ними. Урахування даних критеріїв також допоможе розрахувати раціональне розташування сенсорів на об'єкті.

Висновки

В статті запропоновано математичну модель бездротової сенсорної мережі та розглянуто її основні параметри. Представлена модель демонструє загальні принципи взаємодії елементів мережі та описує процес енергоспоживання її компонентами в стані очікування та активному стані – в процесі прийому та передачі інформації. Підвищення ефективності енергоспоживання є важливим фактором забезпечення функціональної стійкості сенсорної мережі для її тривалої автономної роботи під впливом зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. Для оцінки сенсорної мережі з точки зору теорії функціональної стійкості розглянуто та обґрунтовано критерії зв'язності мережі.

Список літератури

1. Кравченко Ю.В. Функціональна стійкість – властивість складних технічних систем / Ю.В. Кравченко, О.В. Барабаш // Збірник наукових праць НАОУ. – К.: НАОУ, 2002. – Бюл. №40. – С. 225 – 229.
2. Неділько С.М. Технологічні основи забезпечення функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом / С.М. Неділько, Г.Л. Баранов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: "ХАТ", 2011. – № 9 (86). – С. 202 – 206.
3. Беркман Л.Н. Метод исследования многокритериальной оптимизации (векторного синтеза) параметров сетей FN по результирующему критерию / Л.Н. Беркман, Л.А. Комарова // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – Вип. 4. – С. 164 – 166.

4. Галкін П.В. Аналіз моделей та оптимізації збору інформації в бездротових сенсорних мережах / П.В. Галкін // Восточно-Европейський журнал передових технологій. – 2014. – № 5(9). – С. 24 – 30.

5. Машиков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам / Л.М. Артюшин, О.А. Машиков. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с/

6. Кравченко Ю.В. Применение метода последовательного увеличения ранга k -однородного матрицеда в задаче синтеза структуры псевдоспутниковой радионавигационной системы / Ю.В. Кравченко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К.: 2008. – №2 (2). – С. 19 – 22.

7. Обідін Д.М. Ознаки та критерії функціональної стійкості інтелектуалізованої системи автоматичного управління польотом літака / Д.М. Обідін, О.В. Барабаш // Системи озброєння і військова техніка: Науковий журнал. – Х.: ХУПС, 2012. – № 1 (29). – С. 133 – 136.

8. S. Schmid, R. Wattenhofer, Algorithmic models for sensor networks, in: Proceeding of the 20th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), April 2006.

9. Yu, Jiguo, et al. Connected dominating sets in wireless ad hoc and sensor networks—A comprehensive survey. *Computer Communications* 36.2 (2013): 121 – 134.

10. Levis P., Madden S., Polastre J. and dr. TinyOS: An operating system for wireless sensor networks // W. Weber, J.M. Rabaey, E. Aarts (Eds.) // In Ambient Intelligence. — New York, NY: Springer-Verlag, 2005. — 374 p.

11. Машиков О.А. Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем / О.А. Машиков, О.В. Барабаш // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – Львів: ЦММ ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2005. – Вип. 1. – С. 157 – 163.

12. Барабаш О.В. Вибір показників та критеріїв при оцінюванні функціональної стійкості системи розвідки повітряного противника та оповіщення на етапі її побудови / О.В. Барабаш, В.В. Кіреєнко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2013. – №3. – С. 5 – 7.

13. Саланда І.П. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – Вип. 1. – С. 122 – 126.

Надійшла до редколегії 25.09.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Вишнівський, Державний університет телекомунікацій, Київ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНО УСТОЙЧИВОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

А.В. Собчук, М.А. Коваль, Ю.В. Кравченко, О.В. Барабаш

Предложена математическая модель функционально устойчивой беспроводной сенсорной сети на основе показателей связности сети и обоснованы критерии функциональной устойчивости. Исследованы критерии, позволяющие управлять перенастройкой системы, управлять избыточностью, динамически изменять таблицы маршрутизации в узлах сети, при выходе из строя отдельных сенсоров или линий связи между ними, поможет в дальнейшем рассчитать рациональное расположение сенсоров на объекте.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, функциональная устойчивость, оптимизация, показатели связности.

MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONALLY SUSTAINABLE SENSOR NETWORK

A.V. Sobchuk, M.O. Koval, Yu.V. Kravchenko, O.V. Barabash

This article describes mathematical model of a functionally stable wireless sensor network based on the network connectivity indicators is proposed and the criteria of functional stability are substantiated. The criteria for controlling system reconfiguration, managing redundancy, dynamically changing routing tables at network nodes, and the failure of individual sensors or communication lines between them, will help to calculate the rational arrangement of sensors in the future.

Keywords: wireless sensor network, functional stability, optimization, connectivity indicators.

УДК 519.85

А.М. Чугай, О.В. Панкратов, Т.Є. Романова, Ю.Є. Стоян

Інститут проблем машинобудування імені А.М. Підгорного НАН України, Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ 3D-ДРУКУ ДЛЯ SLS ТЕХНОЛОГІЇ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

В роботі пропонуються конструктивні засоби оптимізації процесу 3D-друку для SLS технології адитивного виробництва. Представлено моделі та методи, що дозволяють одночасного здійснити друк великої кількості виробів із забезпеченням максимального заповнення об'єму робочої камери 3D принтеру з урахуванням технологічних обмежень. Це дозволяє мінімізувати час та вартість створення прототипів виробів за рахунок істотного скорочення циклів друку.

Ключові слова: 3D-друк, SLS-технології, пакування, метод ϕ -функцій, нелінійна оптимізація

Стан проблеми та огляд літературних джерел

Сучасним підприємствам необхідно оптимізувати матеріальні та фінансові ресурси, підвищувати ефективність виробництва й у цілому міняти світогляд промислового виробництва.

Прискорити процеси проектування, розробки й виготовлення конструкторських деталей сьогодні дозволяють технології 3D-прототипування [1]. Сучасне проектування неможливо представити без тривимірного прототипування, яке дозволяє швидко створювати дослідні зразки або працюючої моделі системи для демонстрації замовникові або перевірки можливості реалізації абсолютно нової ідеї. На даний момент значного прогресу досягли технології пошарового формування тривимірних об'єктів по їхніх комп'ютерних моделях. Ці технології називаються адитивними і відомі під різними термінами: STL — stereolithography, SLS — Selective Laser Sintering, FDM — Fused Deposition Modeling та інші.

В цій роботі розробляються методи оптимізації процесу 3D-друку для SLS технології адитивного виробництва. Ця технологія використовує лазер високої потужності для спікання невеликих часток пластику, кераміки, скляної борошна або металу в тривимірну структуру.

Головною особливістю цієї технології є застосування порошоків, що складаються з частинок металу, покритих полімером. Після процесу спікання деталь поміщається в високотемпературну піч, де пластик вигорає, а його місце займає легкоплавка бронза. До переваг технології можна віднести відсутність необхідності в матеріалах підтримки. Деталь занурена в порошок, який і виконує функцію підтримки (рис. 1) [2].

В останні 10 років технології 3D-прототипування бурхливо розвиваються: з'являються нові, удосконалюються існуючі, з'являються нові напрямки використання існуючих технологій. Метою досліджень є розробка сучасних інформаційних техно-

логій, які дозволять вдосконалити процес 3D-друку із застосуванням сучасних адитивних технологій.

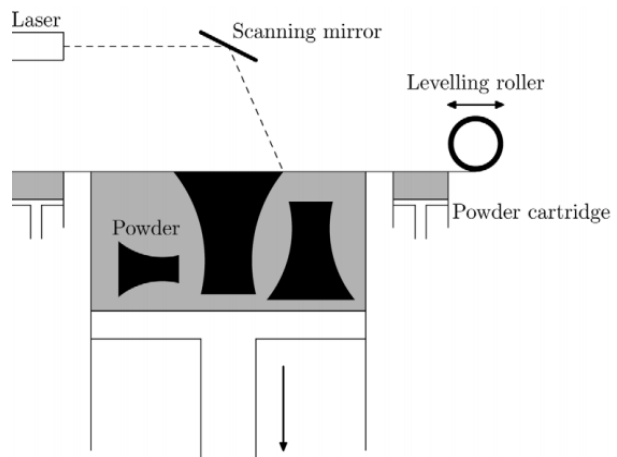


Рис. 1. Технологічна схема 3D-друку із застосуванням SLS-технології

Пропонується розробка методів прискорення циклів друку за рахунок одночасного друку відразу декількох моделей із забезпеченням щільного заповнення усього об'єму робочої камери 3D принтера, що використовує SLS технологію. З цією метою розв'язуються оптимізаційні задачі компоновки тривимірних об'єктів на основі конструктивних засобів математичного та комп'ютерного моделювання, математичних моделей, ефективних методів оптимізації та сучасних NLP-solvers (програмне забезпечення для розв'язування задач нелінійного програмування).

Процес створення нових прототипів умовно можна розбити на дві основні складові: створення віртуальних моделей та виготовлення прототипів. Це дослідження призначено для розробки технологій вдосконалення названих етапів створення прототипів. На першому етапі необхідно створити віртуальні моделі 3D об'єктів (комп'ютерних моделей прототипів).

Одним із завдань другого етапу є скорочення часу та вартості виготовлення прототипів виробів. Адже кожен запуск SLS принтеру потребує часу та

енергії на розігрів та підтримку температури. Так в роботі [3] наведено, якої економії можна досягти за рахунок оптимізації розміщення об'єктів, які необхідно створити.

Моделі та методи, що пропонуються у роботі, дозволяють оптимізувати процес 3D друку за наступними показниками:

- здійснювати одночасний друк відразу декількох моделей із забезпеченням щільного заповнення усього об'єму робочої камери 3D принтера; одночасний друк відразу декількох прототипів із забезпеченням щільного заповнення усього об'єму робочої камери 3D принтера

- мінімізувати час та вартість створення прототипів виробів за рахунок істотного скорочення циклів друку.

Аналіз публікацій, присвячених розв'язанню задачі оптимального розміщення об'єктів, показав, що задачі упаковки довільних 3D об'єктів (які допускають неперевні обертанні) з урахуванням мінімально припустимих відстаней є найменш дослідженими в класі задач розміщення. Серед об'єктів, як правило, розглядаються циліндри або паралелепіпеди, а довільні просторові форми апроксимуються наборами δ -паралелепіпедів. Для розв'язання задач компоновки використовуються евристичні і мета-евристичні алгоритми, що призводить до втрати оптимальних розв'язків.

Таким чином, виникає необхідність в побудові адекватних математичних моделей для задач упаковки з використанням реальних просторових форм об'єктів розміщення та контейнерів, а також з урахуванням технологічних обмежень (заданих мінімально допустимих відстаней). Важливою проблемою також є розробка ефективних алгоритмів розв'язання задач компоновки з використанням сучасних локальних і глобальних NLP-solvers.

Постановка задачі

Для того, щоб мінімізувати час, який використовується для створення прототипів за допомогою SLS-технології, об'єкти повинні бути розташовані якомога щільніше та кількість шарів повинна бути мінімізована. Тому проблема мінімізації шарів може бути сформульована як задача упаковки об'єктів у контейнер мінімальної висоти.

Нехай задані об'єкти P_i , $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$, та прямий прямокутний паралелепіпед

$C = \{X \in R^3 : w_2 \leq x_1 \leq w_1, l_2 \leq x_2 \leq l_1, \eta_2 \leq x_3 \leq \eta_1\}$, параметри якого η_1, η_2 є змінними. Тоді вектор $\eta = (\eta_1, \eta_2)$ визначає висоту C . Об'єкти P_i можуть приймати довільну просторову форму [4].

Розміщення об'єктів P_i у просторі R^3 визначається вектором трансляції $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ та вектором кутів обертання $\theta_i = (\phi_i, \psi_i, \omega_i)$, $i \in I$. Таким

чином, $u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in R^m$, де $m = 6n$, визначає вектор змінних об'єктів,

$$u_i = (v_i, \theta_i) = (x_i, y_i, z_i, \phi_i, \psi_i, \omega_i).$$

Надалі об'єкт P_i з вектором v_i та кутами θ_i позначимо через $P_i(u_i)$, а прямий прямокутний паралелепіпед C зі змінними розмірами η через $C(\eta)$.

Задача. Необхідно визначити вектор $u \in R^m$, який забезпечує розміщення $P_i(u_i)$, $i \in I$, з урахуванням мінімально припустимих відстаней в прямому прямокутному паралелепіпеді $C(\eta)$ так, щоб його висота $H(\eta) = (\eta_2 - \eta_1)$ досягала мінімального значення.

Математична модель та метод розв'язання

На основі методу phi-функцій [4-7] математична модель задачі може бути записана у вигляді наступної задачі нелінійного програмування:

$$\min_{(u, \eta) \in \Lambda} H(\eta), \quad (1)$$

$$\Lambda = \{(u, \eta) \in R^{m+2} :$$

$$\text{де } \Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0, 0 < i < j \in I, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\}. \quad (2)$$

$$\Phi_i(u_i, \eta) \geq 0, i \in I,$$

У системі (2) $\Phi_{ij}(u_i, u_j)$ – або псевдонормалізована квазі-phi-функція, або псевдонормалізована phi-функція (задає умови неперетину об'єктів P_i та P_j), $\Phi_i(u_i, \eta)$ – phi-функція для P_i і об'єкту $cl(R^3 \setminus C^*)$ (задає умови розміщення P_i у контейнері C).

Доведено, що $\Lambda = \bigcup_{q=0}^{\zeta} \Lambda_q$, де кожна з підобластей Λ_q визначається системою нерівностей, ліві частини яких є нескінченно диференційовані функції. Таким чином, для знаходження точки глобального мінімуму задачі (1)-(2) необхідно розв'язати задачу

$$\min \{H(\eta^{*q}), q = 0, 1, \dots, \zeta\},$$

$$\text{де } \min_{(u, \eta) \in \Lambda_q} H(\eta).$$

Оскільки $\zeta \gg n!$, то за розумний час неможливо знайти розв'язок цієї задачі.

Добре відомо, що задачі упакування тривимірних об'єктів є NP-складними, а тому для пошуку їх наближеного розв'язку використовується досить широкий спектр методів, починаючи від евристичних (евристики, засновані на різних правилах, генетичні алгоритми, імітаційне відпалювання, решітки) до традиційних оптимізаційних методів. Але жоден з відомих нам авторів не розв'язує задачу тривимірного пакування за умови можливості безперервного обертання об'єктів через складність побудови адекватної математичної моделі та проведення великого об'єму обчислень.

Тому для пошуку наближення до глобального мінімуму задачі (1)-(2) пропонується підхід, який складається з наступних етапів: побудова початкових точок, пошук точок локальних мінімумів та їх спрямований неповний перебір для отримання наближення до глобального мінімуму.

Для отримання початкових точок покриваємо об'єкти P_i кулями S_i мінімальних радіусів ρ_i^v , $i \in I$. Припускаємо, що $\eta = \eta^0$, зафіксовано i забезпечує розміщення багатогранників у контейнері C . Радіуси ρ_i куль S_i , $i \in I$, є змінними і формують вектор $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) \in R^n$. Сформулюємо таку задачу:

$$\max_{(v, \rho) \in \Omega} \sum_{i=1}^n \rho_i, \quad (3)$$

$$\Omega = \{(v, \rho) \in R^{4n}, \Phi_{ij}^{SS}(v_i, v_j, \rho_i, \rho_j) \geq 0, \\ \text{де } i < j \in I, \Phi_i^S(v_i, \rho_i) \geq 0, i \in I, \quad (4)$$

$$\rho_i - \rho_i^v \geq 0, i \in I\}; \quad v = (v_1, v_2, \dots, v_n),$$

$$\Phi_{ij}^{SS}(v_i, v_j, \rho_i, \rho_j) = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + \\ + (z_i - z_j)^2 - (\rho_i + \rho_j)^2;$$

$$\Phi_i^S(v_i, \rho) = \min\{x_i - \rho_i - w_2^0, y_i - \rho_i - l_2^0, \\ z_i - \rho_i - \eta_2^0, w_1^0 - x_i - \rho_i, l_1^0 - y_i - \rho_i, \eta_1^0 - z_i + \rho_i\}.$$

Задаємо початкову точку (v^0, ρ^0) , де $v_i^0 \in C(\eta^0)$, $\rho^0 = 0$ і для цієї точки обчислюємо точку глобального максимуму (v^*, ρ^*) задачі (3)-(4).

Після цього беремо багатогранники $P_i(v_i^*)$ замість куль $S_i(v_i^*)$, задаємо випадково кути $\theta_i^s = (\phi_i^s, \psi_i^s, \omega_i^s)$, $i \in I$, фіксуємо їх та розв'язуємо задачу

$$\min_{(v, \eta) \in W \subset R^{3n+2}} H(\eta), \quad (5)$$

$$\text{де } W = \{(v, \eta) \in R^{3n+2} : \Phi_{ij}(v_i, v_j) \geq 0, 0 < i < j \in I, \\ \Phi_i(v_i, \eta) \geq 0, i \in I, \quad (6)$$

$$w_1 \geq 0, l_1 \geq 0, \eta_1 \geq 0, w_2 - w_1 \geq 0,$$

$$l_2 - l_1 \geq 0, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\}.$$

Вочевидь, що $W = \bigcup_{q=0}^{\zeta} W_q$, де Γ_q визначається лінійною системою нерівностей. Це означає, що пошук точок локальних мінімумів зводиться до розв'язання послідовності задач лінійного програмування.

Нехай точка (v^*, η^*) є точкою локального мінімуму задачі (5)-(6). Після цього будуюмо початкову точку $(u^s, \eta^s) = (v^*, \theta^s, \eta^*)$. Для цієї початкової точки знаходимо точку (u^{0*}, η^{0*}) локального мінімуму задачі (1)-(2).

Спрямований неповний перебір локальних мінімумів задачі (1)-(2) зводиться до розв'язку наступних допоміжних задач.

Припускаємо, що коефіцієнти гомотетії $h = (h_1, h_2, \dots, h_n) \in R^n$ є змінними. Сформулюємо таку задачу:

$$\min_{Y=(u, \eta, h) \in \Delta} H(\eta), \quad (7)$$

$$\text{де } \Delta = \{Y \in R^{7n+2}, \Phi_{ij}(u_i, u_j, h_i, h_j) \geq 0, \\ i < j \in I, \Phi_i(u_i, \eta, h_i) \geq 0, \quad (8)$$

$$h_i \geq 0, i \in I, H(\eta^{0*}) - H(\eta) \geq \varepsilon, w_1 \geq 0, l_1 \geq 0,$$

$$\eta_1 \geq 0, w_2 - w_1 \geq 0, l_2 - l_1 \geq 0, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\};$$

$$\varepsilon = (0.5)^t \cdot 0.1H(\eta^{0*}), t = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Для початкової точки $Y^0 = (u^{0*}, \eta^{0*}, h^v)$ знаходимо точку локального мінімуму

$$Y^{*1} = (u^{*1}, \eta^{*1}, h^{*1}).$$

Будуємо послідовність $h_1^1 \geq h_2^1 \geq \dots \geq h_n^1$. На основі цієї послідовності та послідовності

$$l = h_1^v \geq h_2^v \geq \dots \geq h_n^v$$

Формуємо точку (\tilde{u}, \tilde{h}) , де

$$\tilde{u}_j = u_{i_j}^{*1}, \tilde{h}_j = \min\{h_{i_j}^1, h_j^v\}, j \in I.$$

Далі для початкової точки (\tilde{u}, \tilde{h}) обчислюємо точку (u^0, h^0) локального максимуму задачі

$$\max_{(u, h) \in D} F(h) \quad (10)$$

$$\text{де } F(h) = \sum_{i=1}^n h_i,$$

$$D = \{(u, h) \in R^{7n}, \Phi_{ij}(u_i, u_j, h_i, h_j) \geq 0, \quad (11)$$

$$i < j \in I, \Phi_i(u_i, h_i) \geq 0, h_i^v - h_i \geq 0, h_i \geq 0, i \in I\}.$$

Якщо

$$\sum_{i=1}^n h_i^0 = \sum_{i=1}^n h_i^v = b,$$

то всі P_i , $i \in I$, пакуються у $C(\eta^1)$. У цьому випадку для початкової точки (u^0, η^{0*}) знову розв'язуємо задачу (1)-(2) і так далі.

Якщо $j \neq i_j, j \in I$, хоча б для однієї пари індексів i $F(h^0) < b$, то збільшуємо t у (9) на 1 і розв'язуємо задачу (7)-(8) і так далі, поки не отримаємо $F(h^0) = b$ або $j = i_j, j \in I$.

У випадку $F(h^0) = b$ переходимо до розв'язування задачі (1)-(2).

Якщо $j = i_j, j \in I$, то попередня точка локального мінімуму задачі (1)-(2) приймається у якості наближення до точки глобального мінімуму цієї задачі.

Відзначимо, що для пошуку локальних екстремумів сформульованих оптимізаційних задач розроблено спеціальний метод декомпозиції, який дозволяє значно зменшити обчислювальні витрати за ра-

хунок значного зменшення кількості нерівностей у процесі пошуку локальних екстремумів. Ключова ідея процедури оптимізації дозволяє генерувати підмножини області припустимих розв'язків на кожному кроці в такий спосіб. На основі аналізу стартової точки в систему обмежень задачі додається система додаткових обмежень на параметри розміщення кожного об'єкта, що дозволяють переміщатися об'єкту в межах індивідуального прямокутного контейнера. Після цього видаляються ρ -нерівності для всіх пар об'єктів, індивідуальні контейнери яких не перетинаються. Таким чином, ми зменшуємо число обмежень і, у випадку квазіфізичних- ρ -функцій, кількість додаткових змінних. Після проводиться пошук точки локального мінімуму для побудованої підзадачі. Отриманий локальний екстремум підзадачі використовується в якості стартової точки для наступної ітерації.

На рис. 2 представлено приклади упаковок 3D об'єктів, отриманих за допомогою запропонованих методів.

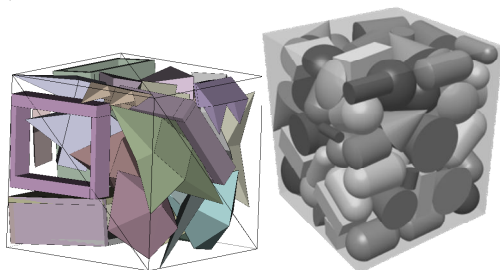


Рис. 2. Приклади локально-оптимальних упаковок 3D-об'єктів з урахуванням мінімально припустимих відстаней

Висновки

Процедура 3D-друку з використанням SLS-технології є досить тривалою за часом (друк може тривати багато годин або навіть днів) та потребує великих фінансових витрат, пов'язаних із запуском принтеру, нагрівом камери та стабілізацією температури.

ОПТИМИЗАЦІЯ ПРОЦЕСА 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ SLS ТЕХНОЛОГІЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.М. Чугай, А.В. Панкратов, Т.Е. Романова, Ю.Е. Стоян

В работе предлагаются конструктивные средства оптимизации процесса 3D-печати для SLS технологии аддитивного производства. Представлены модели и методы, позволяющие одновременно осуществлять печать большого количества изделий с обеспечением максимального заполнения объема рабочей камеры 3D принтера с учетом технологических ограничений. Это позволяет минимизировать время и стоимость создания изделий за счет существенного сокращения числа циклов печати.

Ключевые слова: 3D-печать, SLS-технологии, упаковки, метод ρ -функций, нелинейная оптимизация.

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF 3D-PRINTING FOR SLS TECHNOLOGIES OF ADDITIVE PRODUCTION

A.M. Chugay, A.V. Pankratov, T.E. Romanova, Yu.E. Stoyan

The paper studies constructive tools of optimizing the 3D printing process in SLS additive production technology. We develop NLP model and solution algorithm that allow us simultaneously printing a large number of products to maximize the volume of the working chamber of a 3D printer, taking into account technological requirements. We minimize the time and cost of creating products by significantly reducing the number of printing cycles.

Keywords: 3D printing, SLS technology, packing, ρ -functions method, nonlinear optimization.

Необхідно відзначити, що час, необхідний для спікання порошку є значно меншим, ніж час, необхідний для підготовки кожного шару порошку. В роботі пропонується скоротити часові та фінансові витрати за рахунок забезпечення одночасного друку максимальної кількості виробів із забезпеченням оптимального пакування об'єктів з урахуванням технологічних обмежень. Мінімізація висоти області, у якій буде розміщено об'єкти, призводить до мінімізації кількості шарів 3D-друку.

Список літератури

1. Ramya, A. 3D printing technologies in various applications/A. Ramya, Sai Vanapalli // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – Vol. 7, № 3. – 2016. – P.396–409.
2. Egeblad, J. Fast neighborhood search for two- and three-dimensional nesting problems/ J. Egeblad, B.K. Nielsen, A. Odgaard // *European Journal of Operations Research*. – 2007. – №183(3). – С. 1249-1266.
3. Baumer, M. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push / Baumer M., Dickens P., Tuck C., Hague R. // *Technological Forecasting & Social Change*. –2016. –№102. – P.193–201.
4. Stoyan, Y.G., Modeling Close Packing of 3D Objects/ Y.G. Stoyan, V.V. Semkin, A.M. Chugay // *Cybernetics and Systems Analysis* – 2016. –Т.52(2). – С. 296-304.
5. Chernov, N. Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem / N. Chernov, Y. Stoyan, T. Romanova // *Computational Geometry. Theory and Application*. –2010. –№ 43(5). – С. 535–553.
6. Pankratov, A.V. Optimal packing of convex polytopes using quasi- ρ -functions/ A.V. Pankratov, T.E. Romanova, A.M. Chugay // *Проблемы машиностроения*. – 2017. –Т. 18, № 2. – С. 55-65.
7. Stoyan Yu., Romanova T., Pankratov A., Chugay A. (2015) *Optimized object packings using quasi- ρ -functions*// Chapter (pp. 265-293) in contributed book *Optimized Packings and Their Applications/ Springer Optimization and its Applications, G. Fasano and J.Pintér (Editors), Springer, New York, Vol. 105, 326 p.*

Надійшла до редколегії 24.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Гребеннік, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

UDC 519.859

O.M. Khlud, G.N. Yaskov

Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems, Kharkiv

PACKING HOMOTHETIC SPHEROIDS INTO A LARGER SPHEROID WITH THE JUMP ALGORITHM

The article considers a mathematical model of the optimization problem of packing homothetic spheroids (spheres - in particular case) into a larger spheroid (sphere - in particular case). Sphere radii are supposed to be variable. A new algorithm to derive starting points belonging to the feasible region of the problem is offered. According to the jump algorithm solving the problem is reduced to solving a sequence of mathematical programming problems yielding objective improvements. A solution strategy consisting of four stages is proposed. The first stage involves formation of starting points and computation of local minima. The second stage fulfills continuous transition from one local minimum to another. The third stage realizes reduction of the solution space dimension. The fourth stage rearranges sphere pairs to refine the objective. We provide a number of numerical results both for spheres and spheroids.

Key words: packing, sphere, spheroid, optimization, jump algorithm.

Introduction

Problems of packing unequal spheres and spheroids have applications in medicine and biology.

Medical applications of the unequal sphere packing problem in radiosurgery are studied in [1-3]. The gamma-rays are focused on a common center, creating a spherical volume of high radiation dose. A key geometric problem in gamma knife treatment planning is to fit balls into a 3D irregular-shaped tumor. In this situation, overlapping balls may cause overdose, and a low packing density may result in underdose and a non-uniform dose distribution.

In biological sciences, the study of chromosome arrangements and their functional implications is an area of great current interest [4]. The territory occupied by each chromosome can be modeled as an spheroid, different chromosomes giving rise to spheroids of different size. The enclosing spheroid represents a cell nucleus, the size and shape of which differs across cell types. Overlap between chromosome territories has biological significance: it allows for interaction and co-regulation of different genes.

Sutou and Day [3] propose a global optimization approach to unequal sphere packing problems. The optimization problem is formulated as a nonconvex optimization problem with quadratic constraints and a linear objective function. Paper [5] offers a mathematical optimization method for packing unequal spheres into a cuboid based on the decremental neighborhood method and a local optimization method. An algorithm to pack unequal spheres in a larger sphere using tabu search, the quasi-human basin-hopping strategy and the Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno method is developed in [6]. A set of examples are calculated.

In this paper, we adopt the jump algorithm (JA) developed for unequal circle packing [7] to pack un-

equal sphere in a sphere of minimal radius. JA allows to transit from one local minimum point to another one so that the larger sphere radius decreases.

First we consider the packing problem of spheres.

All given spheres

$$S_i = \{v_i \in \mathbf{R}^3 : (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - \hat{r}_i^2 \leq 0\}$$

where $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ are center coordinates of S_i , $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$, have to be packed into a sphere

$$S = \{(x, y, z) \in \mathbf{R}^3 : x^2 + y^2 + z^2 - R^2 \leq 0\},$$

We assume that the radius R ($R \gg \hat{r}_i$, $i \in I$) of S is variable.

A sphere S_i translated by a vector v_i and a sphere S with variable size R are denoted by $S_i(v_i)$ and $S(R)$ respectively. A vector $v = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in \mathbf{R}^{3n}$ defines an arrangement of S_i , $i \in I$, in the Euclidean 3-D space \mathbf{R}^3 .

Without loss of generality, we suppose that

$$\hat{r}_1 \leq \hat{r}_2 \leq \dots \leq \hat{r}_n, \quad \hat{r}_1 < \hat{r}_n. \quad (1)$$

Then we consider the packing problem of spheroids.

Each homothetic spheroid $E_i(v_i)$, $i \in I$, is generated by rotation of an ellipse of semi-axes a_i and b_i , $a_i > b_i$, along the axis of revolution OX , therefore we assume that third semi-axis is defined as $c_i = b_i$ and $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ is a translation vector. All spheroids have to be packed into an spheroid

$$E = \{(x, y, z) \in \mathbf{R}^3 : \frac{x^2}{\lambda A} + \frac{y^2}{\lambda B} + \frac{z^2}{\lambda C} - 1 \leq 0\},$$

where A, B, C is semi-axes of container and λ is a coefficient of homothety.

Problem. Find a vector v ensuring a packing of spheres $S_i(v_i)$, $i \in I$, (spheroids $E_i(v_i)$) without

their mutual overlappings within the sphere S of the minimal radius R^* (spheroid E with the minimal coefficient of homothety λ^*).

Mathematical model

A mathematical model of the problem can be stated as

$$\mu^* = \min \mu, \text{ s.t. } Y = (\mu, v) \in W \subset \mathbf{R}^{3n+1} \quad (2)$$

where

$$W = \{Y \in \mathbf{R}^{3n+1} : \Phi_{ij}(v_i, v_j) \geq 0, 0 < i < j \in I, \Phi_i(v_i, R) \geq 0, i \in I\}, \quad (3)$$

$$\mu = \begin{cases} R & \text{in the case of sphere packing,} \\ \lambda & \text{in the case of ellipsoids packing.} \end{cases}$$

Here $\Phi_{ij}(v_i, v_j) = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 - (\hat{r}_i + \hat{r}_j)^2 \geq 0$ ensures non-overlapping spheres S_i and S_j , $\Phi_i(v_i, R) \geq 0$ provides a placement of $S_i(v_i)$ within $S(R)$ and $\Phi_i(v_i, R) = -x_i^2 - y_i^2 - z_i^2 + (R - \hat{r}_i)^2$. The condition of non-overlapping homotetic spheroids is

$$\Phi_{ij}(v_i, v_j) = \frac{(x_j - x_i)^2}{(a_i + a_j)^2} + \frac{(y_j - y_i)^2}{(b_i + b_j)^2} + \frac{(z_j - z_i)^2}{(c_i + c_j)^2} - 1$$

and the condition of placement spheroid $E_i(v_i)$, $i \in I$, in container $E(\lambda)$ is

$$\Phi_i(v_i, \lambda) = 1 - \frac{(x_i)^2}{(\lambda A - a_i)^2} - \frac{(y_i)^2}{(\lambda B - b_i)^2} - \frac{(z_i)^2}{(\lambda C - c_i)^2}$$

if spheroids E_i , $i \in I$, and E are homothetic.

The mathematical model (2)–(3) possesses the same characteristics as that of the mathematical models considered in [8], i.e. local minima are reached at extreme points of W , the matrix of the inequality system in (3) is strongly sparse, the problem stated is NP-hard. Thus, in general, a global minimum of the problem can be reached but only in a theoretical manner.

Consequently, for successfully solving problem (2)–(3) it needs to be able to construct starting points belonging to the feasible region W , to compute local minima and to derive an effective non-exhaustive search for local minima.

In what follows we consider the sphere packing. One may consider homothetic spheroids instead of spheres by replacing spheres S_i by spheroids E_i , $i \in I$, and radius R by coefficient of homothety λ .

Generating starting points and searching for local minima

Primarily, we suppose that radii r_i of spheres S_i , $i \in I$, are variables and form a vector $r = (r_1, r_2, \dots, r_n) \in \mathbf{R}^n$. In the case, the inequalities in system (3) take the form

$$\Phi_{ij}(v_i, v_j, r_i, r_j) \geq 0, 0 < i < j \in I, \Phi_i(v_i, r_i, R) \geq 0, i \in I.$$

Thus, $X = (v, r) \in \mathbf{R}^{4n}$ is the vector of all variables.

Let $R = R^0 > 0$. We form a point $X^0 = (v^0, 0)$ so that $v_i^0 \in P(R^0)$, $i \in I$, i.e. points $v_i^0 \in \mathbf{R}^3$, $i \in I$, are randomly thrown in the sphere $P(R^0)$.

In order to construct a point $(v, R^0) \in W$ on the ground of the point (v^0, R^0) we solve the problem

$$\Psi(\hat{r}) = \max \sum_{i=1}^n r_i, \text{ s.t. } X = (v, r) \in D \subset \mathbf{R}^{4n}, \quad (4)$$

where

$$D = \{X \in \mathbf{R}^{4n} : \Phi_{ij}(v_i, v_j, r_i, r_j) \geq 0, 0 < i < j \in I, \Phi_i(v_i, r_i, R^0) \geq 0, \phi_i(r_i) = \hat{r}_i - r_i \geq 0, r_i \geq 0, i \in I\}. \quad (5)$$

It follows from the construction of X^0 that $X^0 \in D$. So taking starting point X^0 we tackle problem (4)–(5) and obtain a local maximal point $\hat{X} = (\hat{v}, \hat{r})$. Note that in addition to the characteristics of problem (2)–(3), problem (4)–(5) possesses the properties:

(i) Inequalities $\phi_i(r_i) \geq 0$, $i \in I$, in (5) imply that if

$$\Psi(\hat{r}) = \sum_{i=1}^n \hat{r}_i = \sum_{i=1}^n \hat{r}_i = b,$$

then $\hat{r} = \hat{r}$ and spheres S_i , $i \in I$, are packed into $S(R^0)$. This means the point \hat{X} is a global maximal point of problem (4)–(5).

(ii) If $\Psi(\hat{r}) < b$, and \hat{X} is a global maximal point of problem (4)–(5), then spheres S_i , $i \in I$, can not be packed into $P(R^0)$.

Depending on R^0 two cases can be found:

i. $\Psi(\hat{r}) = b$ and ii. $\Psi(\hat{r}) < b$.

It follows from item (i) that $(\hat{v}, R^0) \in W$ if $\Psi(\hat{r}) = b$. The point (\hat{v}, R^0) is not in the general case a local minimal point of problem (2)–(3). So, taking starting point (\hat{v}, R^0) we calculate a local minimal point (\tilde{v}, \tilde{R}) of problem (2)–(3) regarding the interaction of the placed spheres.

Let $\Psi(\hat{r}) < b$. Then we either choose $X^0 = (v^0, 0)$ in a random way again and solve sequentially problems (4)–(5) and (2)–(3) or try to execute a transition from \hat{X} to \tilde{X} so that $\Psi(\hat{r}) > \Psi(\tilde{r})$.

Solution strategy

To compute a local minimum of problem (2)–(3) we derive a step by step procedure that includes tackling problems (2)–(3) and (4)–(5).

Primarily, we choose $R = R^0$ guaranteeing an arrangement of spheres S_i of radii \hat{r}_i , $i \in I$, into the sphere $S(R^0)$. Then we take a point $X^0 = (v^0, 0)$ in a random way so that $v_i^0 \in S(R^0)$, $i \in I$, and, using starting point X^0 , solve problem (4)–(5). As a result, a local maximal point $\hat{X} = (\hat{v}, \hat{r})$ is found. Because of the choice $R = R^0$ we always have $\Psi(\hat{r}) = b$, i.e. $\hat{r} = \hat{r} = (\hat{r}_1, \hat{r}_2, \dots, \hat{r}_n)$. This means that $(\hat{v}, R^0) \in W$. So, taking a starting point (\hat{v}, μ^0) , we solve problem (2)–(3) and calculate a local minimal point $(\check{v}^0, \check{R}^0)$.

The jump algorithm (JA) permits to execute a continuous transition from a local maximal point of problem (4)–(5) to another one ensuring an increase of $\Psi(r)$. Let $\hat{X} = (\hat{v}, \hat{r})$ be a local maximal point of the problem (4)–(5) and $\Psi(\hat{r}) = \sum_{i=1}^n \hat{r}_i < b$, i.e. at least one of the inequalities $\hat{r}_i - \hat{r}_i \geq 0$, $i \in I$, is not active. We formulate the auxiliary problem

$$\max V(r) = \sum_{i=1}^n r_i^3, \text{ s.t. } X \in M \subset \mathbf{R}^{4n}, \quad (6)$$

$$M = \{X \in \mathbf{R}^{4n} : \Phi_{ij}(v_i, v_j, r_i, r_j) \geq 0, 0 < i < j \in I,$$

$$\Phi_i(v_i, r_i, R^0) \geq 0, \quad \Psi_{1i}(r_i) = r_{\max} - r_i \geq 0, \quad (7)$$

$$\Psi_{2i}(r_i) = -r_{\min} + r_i \geq 0, \quad i \in I\},$$

where $r_{\max} = \max\{\hat{r}_i, i \in I\}$ and $r_{\min} = \min\{\hat{r}_i, i \in I\}$.

Now, let $(\check{v}^0, \check{R}^0)$ be a local minimal point of problem (2)–(3). We compute

$$r_i^\lambda = \hat{r}_i - \left(\frac{1}{2}\right)^{\lambda+2} \hat{r}_i = \hat{r}_i(1 - (0.5)^{\lambda+2}), \quad i \in I, \lambda = 0, 1, \dots$$

and assume that sphere radii are equal to r_i^λ , $i \in I$. Then problem (2)–(3) takes the form

$$\check{R} = \min R \text{ s.t. } Y = (v, R) \in W^\lambda \subset \mathbf{R}^{3n+1}, \quad (8)$$

where $W^\lambda = \{Y \in \mathbf{R}^{3n+1} : \Phi_{ij}^\lambda(v_i, v_j) \geq 0,$

$$0 < i < j \in I, \Phi_i^\lambda(v_i, R) \geq 0, \quad i \in I\},$$

$$\Phi_{ij}^\lambda(v_i, v_j) = \|v_i - v_j\|^2 - (r_i^\lambda + r_j^\lambda)^2,$$

$$\Phi_i^\lambda(v_i, \mu) = -x_i^2 - y_i^2 - z_i^2 + (R - r_i^\lambda)^2.$$

Since $r_i^\lambda < \hat{r}_i$, $i \in I$, then the point $(\check{v}^0, \check{R}^0) \in W^\lambda$ and $(\check{v}^0, \check{R}^0)$ is not a local minimal point of problem (8). So, taking starting point $(\check{v}^0, \check{R}^0)$, we solve problem (12) and define a local minimal point $(\check{v}^0, \check{R}^0)$. Since $\sum_{i=1}^n r_i^\lambda < b$, then, tackling problem (4)–(5) for starting point $X^0 = (\check{v}^0, r^\lambda) \in D$, we compute a local maximal point $\hat{X}^\lambda = (\hat{v}^\lambda, \hat{r}^\lambda)$. Two

cases are possible: $\Psi(\hat{r}^\lambda) = b$ and $\Psi(\hat{r}^\lambda) < b$. If $\Psi(\hat{r}^\lambda) = b$, then $\hat{r}_i^\lambda = \hat{r}_i$, $i \in I$, and hence $(\hat{v}^\lambda, \check{R}^0) \in W$. Since the solution spaces of problems (2)–(3) and (4)–(5) are different, then $(\hat{v}^\lambda, \check{R}^0)$ in general is not a local minimal point of problem (2)–(3). So, taking starting point $(\hat{v}^\lambda, \check{R}^0)$, we solve problem (2)–(3). As a result, a new local minimum point $(\check{v}^1, \check{R}^1)$ is computed. In this case a local minimal point $(\check{v}^1, \check{R}^1)$ of problem (8) for the starting point $(\check{v}^1, \check{\mu}^1)$ is computed again, and so on until $\Psi(\hat{r}^\lambda) < b$ becomes, i.e. we have $\sum_{i=1}^n \hat{r}_i^\lambda < b$, $\hat{X}^\lambda = (\hat{v}^\lambda, \hat{r}^\lambda)$ and $(\hat{v}^\lambda, \check{\mu}^\lambda) \notin W$ after λ iterations.

In this situation ($\Psi(\hat{r}^\lambda) < b$) we compute the steepest ascent vector Z^0 at the point \hat{X}^λ for problem (6)–(7), define $\gamma = m$, construct a point $X^m = (v^m, r^m) \in D$ according to (8) and the ascending sequence (see (1))

$$r_{i_1}^m \leq r_{i_2}^m \leq \dots \leq r_{i_n}^m. \quad (9)$$

Since $V(r^m) > V(\check{P})$ may occur, then, making use of sequence (9), we compute $r_{i_j}^{m0} = \min\{r_{i_j}^m, \check{P}_j\}$, $j \in I$.

This ensures the inequality $V(r^{m0}) \leq V(\check{P})$ where $r^{m0} = (r_1^{m0}, r_2^{m0}, \dots, r_n^{m0})$. Based on sequence (9), we construct two points: $\tilde{X}^m = (\tilde{v}^m, \tilde{r}^m)$ where $\tilde{v}_j^m = v_{i_j}^m$, $\tilde{r}_j^m = r_{i_j}^{m0}$, $j \in I$, and point $\tilde{X}^m = (\tilde{v}^m, \tilde{r}^m)$ where $\tilde{v}_j^m = v_{i_j}^m$, $\tilde{r}_j^m = r_{i_j}^m$, $j \in I$.

If $V(\check{P}) > V(\tilde{r}^m) > V(\hat{r}^\lambda)$, then the new steepest ascent vector Z^0 at the point \tilde{X}^m for problem (6)–(7) is calculated. Taking $\hat{X} = \tilde{X}^m$, we build a new point $X^m = \hat{X} + (1/2)^m Z^0$ and construct new points $\tilde{X}^m = (\tilde{v}^m, \tilde{r}^m)$ and $\tilde{X}^m = (\tilde{v}^m, \tilde{r}^m)$ in accordance with sequence (13), and so on. The iterative process is continued until either $V(\tilde{r}^m) = V(\check{P})$ or $V(\tilde{r}^m) \leq V(\hat{r}^\lambda) < V(\check{P})$ occurs.

If $V(\tilde{r}^m) = V(\check{P})$, i.e. $\tilde{r}_i^m = \check{P}_i$, $i \in I$, then taking starting point $(\tilde{v}^m, \check{R}^\lambda)$, we tackle problem (2)–(3) and calculate a new local minimal point $(\check{v}^0, \check{R}^0)$. The process is repeated until $V(\tilde{r}^m) \leq V(\hat{r}^\lambda) < V(\check{P})$ becomes.

Reduction of the solution space dimension is realized by means of sequential fixing initial values of sphere radii without fixing their center coordinates.

To the aim we take the point \tilde{X}^m , single out $\tilde{r}_i^m > \hat{r}_i$, $i \in I^1 \subset I$, and calculate

$$\delta^1 = 4 / 3 \cdot \max\{(\tilde{r}_i^m)^3 - (\hat{r}_i)^3, i \in I^1\}.$$

Let δ^1 correspond to radius \hat{r}_t . Hence, δ^1 is an increment of volume of the sphere S_t when varying its radius from \hat{r}_t to \tilde{r}_t^m . This means that if $r_t = \hat{r}_t$, then there is a volume reserve around the sphere S_t . In order to use the reserve we fix radius $r_t = \hat{r}_t$ and derive a point $\tilde{X}^{m1} = (\tilde{v}^m, \tilde{r}_1^m, \tilde{r}_2^m, \dots, \tilde{r}_{t-1}^m, \tilde{r}_{t+1}^m, \dots, \tilde{r}_n^m) \in \mathbf{R}^{4n-1}$, i.e. r_t is no longer a variable and, hence, the dimension of the solution spaces D and M decreases by 1. Then, taking starting point \tilde{X}^{m1} we realize JA in the space \mathbf{R}^{4n-1} . If

$$V(\tilde{r}^{m1}) = V(\hat{r}) = \sum_{i=1}^n (\hat{r}_i)^3,$$

then we take starting point $(\tilde{v}_i^{m1}, \tilde{R}^\lambda)$, tackle problem (2)–(3) and calculate a new local minimal point $(\tilde{v}^0, \tilde{R}^0)$. If $V(\tilde{r}^{m1}) < V(\hat{r})$, we continue to reduce the solution space dimension. If $V(\tilde{r}^{m1}) < V(\hat{r})$ and all spheres S_i , $i \in I^1 \subset I$, are exhausted, we increase λ by 1 and realize JA again. The process is continued until $(1/2)^{\lambda+2} \hat{r}_i < \varepsilon$, $i \in I$.

After that we take the local minimal point $(\tilde{v}^0, \tilde{R}^0)$ of problem (2)–(3) and rearrange sphere pairs whose radii are slightly distinguished. This allow to improve the objective value of problem (2)–(3). An algorithm executing such rearrangements is described in [9]. In order to obtain a good approximation to a global minimum of problem (2)–(3) we repeat the step-by-step procedure consisting of the construction of a starting point and the search for a local minimum of problem (2)–(3) with JA v times. As a result local minimum points (v^{*t}, R^{*t}) , $t \in T = \{1, 2, \dots, v \leq 10\}$ are computed.

Then we single out a local minimal point (v^{*0}, R^{*0}) corresponding to $R^{*0} = \min\{R^{*t}, t \in T\}$. The point (v^{*0}, R^{*0}) is taken as an approximation to a global minimum of problem (2)–(3).

Numerical examples

In order to verify effectiveness of JA, we solve the benchmark instances for packing spheres into a sphere considered in [6]. Moreover, we solve examples for packing spheroids.

We compare results of packing spheres $r_i = i$, $i = 1, 2, \dots, n$, into a larger sphere calculated by the algorithm [6] and JA. In Table 1, the first and the second column give example names and numbers of spheres to be packed. The third and the forth column summarize the best values of radii obtained in [6] (R_H) and with JA (R^{*0}). The percentage of improvement of JA against the

best known results is shown in the last column. The calculation time by means of JA varied from 10 seconds to 12 hours depending on the number of spheres.

Table 1

Results of packing spheres of radii $r_i = i$ into a sphere

Example	n	R_H	R^{*0}	improve
ZHXF16	16	33.6582	33.6572	0
ZHXF17	17	36.2030	36.2021	0
ZHXF18	18	38.8463	38.8467	-0
ZHXF19	19	41.5452	41.5462	-0
ZHXF20	20	44.2737	44.2557	0.04
ZHXF21	21	47.0342	47.0332	0
ZHXF22	22	49.9068	49.8666	0.08
ZHXF23	23	52.8368	52.7425	0.18
ZHXF24	24	55.7546	55.5782	0.32
ZHXF25	25	58.4684	58.4665	0
ZHXF26	26	61.4745	61.3883	0.14
ZHXF27	27	64.4854	64.4141	0.11
ZHXF28	28	67.4837	67.4173	0.1
ZHXF29	29	70.5257	70.3911	0.19
ZHXF30	30	73.4813	73.3704	0.15
ZHXF31	31	76.5336	76.5057	0.04
ZHXF32	32	79.8018	79.6075	0.24
ZHXF33	33	83.1967	82.8314	0.44
ZHXF34	34	86.2430	85.9206	0.37
ZHXF35	35	89.3454	89.1536	0.21
ZHXF40	40	-	105.6146	-
ZHXF50	50	-	140.7613	-
ZHXF60	60	-	178.1920	-
ZHXF70	70	-	217.0801	-
ZHXF80	80	-	258.4230	-
ZHXF90	90	-	300.9910	-
ZHXF100	100	-	345.5416	-

Illustration for ZHXF33 is shown in fig. 1.

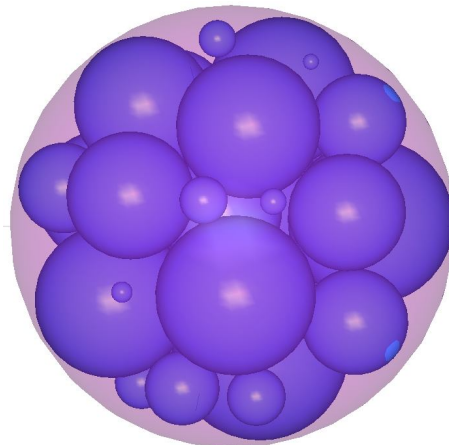


Fig. 1. Example ZHXF33

We provide results of packing homothetic spheroids (spheroids) E_i , $i \in I$, into a spheroid. For $n = 15$ spheroids $\lambda^* = 0.22659$ and sizes $(A^*, B^*, C^*) = (16.9948, 5.6649, 5.6649)$. In case $n = 20$ $\lambda^* = 0.321$ and sizes $(A^*, B^*, C^*) = (39.0005, 13.0002, 13.0002)$. For $n = 30$ ellipses $\lambda^* = 0.1421$ and sizes $(A^*, B^*, C^*) = (21.3155, 7.10516, 7.10516)$. $\lambda^* = 0.4578$ and sizes $(A^*, B^*, C^*) = (160, 55, 55)$ for $n = 50$ spheroids.

Illustration for example of packing 15(30) spheroids is shown in fig. 2. The Interior Point Optimizer (IPOPT) exploiting information on Jacobians and Hessians [10], and the concept of ε -active inequalities [8,11] are used when tackling problems (2)–(3), (4)–(5) and (6)–(7).

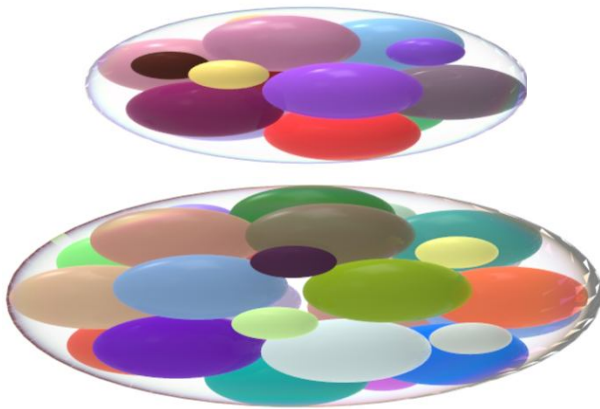


Fig. 2. Examples of packing 15 and 30 spheroids

Conclusion

Algorithm JA is effective to solve the sphere and homothetic spheroids packing problems and improves known results for benchmark.

The algorithm is especially effective if neighbor initial radii of spheres (half-axes of spheroids) in the sequence (1) are slightly distinguished.

A decrease of the problem dimension by means of sequential fixing sphere radius values sometimes permits to improve the objective values of problem (2)–(3).

The algorithm can be adopted to solve the problem of packing spheres and homothetic spheroids in containers of more complex geometric shapes.

References

1. Wang, J. Packing of unequal spheres and automated radiosurgical treatment planning / J. Wang // *Journal of Combinatorial Optimization*. – 1999. – Vol.3. – P. 453–463.
2. Chen, D.Z. Algorithms for congruent sphere packing and applications / D.Z. Chen, X. Hu, Y. Huang, Y. Li, J. Xu // *Proc. of Sym. on Comp. Geometry'2001*. – 2001. – P. 212–221.
3. Sutou, A. Global optimization approach to unequal sphere packing problems in 3D / A. Sutou, Y. Day // *Journal of Opt. Theory and Appl.* – 2002. – Vol. 114(3). – P. 671–694.
4. Uhler, C. Packing Spheroids with Overlap / C. Uhler, S.J. Wright // *SIAM Rev.* – 2013. – Vol. 55(4). – P. 671–706.
5. Stoyan, Yu. Packing of Various Solid Spheres into a Parallelepiped / Yu. Stoyan, G. Yaskov, G. Scheithauer // *Central European Journal of Operational Research*. – 2003. – Vol. 11(4). – P. 389–407.
6. Zeng, Z.Z. An algorithm to packing unequal spheres in a larger sphere / Z.Z. Zeng, W.Q. Huang, R.C. Xu // *Advanced Mat. Research*. – 2012. – Vol. 546-547. – P. 1464-1469.
7. Stoyan, Yu. Packing unequal circles into a strip of minimal length with a jump algorithm / Yu. Stoyan, G. Yaskov // *Optimization letters*. – 2014. – Vol. 8. – P. 949–970.
8. Stoyan, Yu.G. Packing identical spheres into a cylinder / Yu.G. Stoyan, G.N. Yaskov // *Int. Transactions in Operational Research*. – 2010. – Vol. 17(1). – P. 51–70.
9. Stoyan, Yu.G. A mathematical model and a solution method for the problem of placing various-sized circles into a strip / Yu.G. Stoyan, G.N. Yaskov // *European Journal of Operational Research*. – 2004. – Vol. 156. – P. 590–600.
10. Wächter, A. On the implementation of a primal-dual interior point filter line search algorithm for large-scale nonlinear programming / A. Wächter, L.T. Biegler // *Mathematical Programming*. – 2006. – Vol. 106(1). – P. 25–57.
11. Zoutendijk, G. Methods of feasible directions. A study in linear and non-linear programming / G. Zoutendijk. Amsterdam-London-New York-Princeton: Elsevier Publishing Company. – 1960. – 126 p.

Надійшла до редколегії 24.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Гребеннік, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

УПАКОВКА ГОМОТЕТИЧНИХ СФЕРОЇДІВ У БІЛЬШОМУ СФЕРОЇДІ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМУ СТРИБКА (JUMP ALGORITHM)

О.М. Хлуд, Г.М. Яськов

У статті розглядається математична модель задачі оптимальної упаковки гомотетичних сфероїдів (сфер у конкретному випадку) більший сфероїд (сфера у конкретному випадку). Радіуси сфер мають бути змінними. Запропоновано новий алгоритм знаходження стартових точок, що належать області допустимих значень. З використанням алгоритму стрибка, вирішення задачі зводиться до розв'язання послідовності задач математичного програмування, що дає об'єктивні покращення. Запропонована стратегія розв'язання складеться з чотирьох етапів. Перший етап включає формування стартових точок та обчислення локального мінімуму. Під час другого етапу виконуються безперервний перехід від одного локального мінімуму до іншого. На третьому етапі відбувається зменшення розмірності простору рішення. На четвертому етапі пари сфер перебудовуються, щоб отримати задані. Ми приводимо результати чисельних експериментів для сфер та сфероїдів.

Ключові слова: упаковка, куля, сфероїд, оптимізація, алгоритм стрибка.

УПАКОВКА ГОМОТЕТИЧНЫХ СФЕРОИДОВ В БОЛЬШЕМ СФЕРОИДЕ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ПРЫЖКА (JUMP ALGORITHM)

О.Н. Хлуд, Г.Н. Яськов

В статье рассматривается математическая модель задачи оптимальной упаковки гомотетичных сфероидов (сфер в конкретном случае) больше сфероид (сфера в конкретном случае). Радиусы сфер должны быть переменными. Предложено новый алгоритм нахождения стартовых точек, принадлежащих области допустимых значений. С использованием алгоритма скачка, решение задачи сводится к решению последовательности задач математического программирования, дает объективные улучшения. Предложенная стратегия решение сложится с четырех этапов. Первый этап включает формирование стартовых точек и вычисления локального минимума. Во время второго этапа выполняются непрерывный переход от одного локального минимума в другой. На третьем этапе происходит уменьшение размерности пространства решения. На четвертом этапе пары сфер перестраиваются, чтобы получить заданные. Мы приводим результаты многочисленных экспериментов для сфер и сфероидов.

Ключевые слова: упаковка, шар, сфероид, оптимизация, алгоритм прыжка.

Інфокомунікаційні системи

УДК 621.391

Е.В. Дуравкин¹, Е.Б. Ткачева¹, Х.М. Мухи-Алдин²

¹ Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харків

² Одеський національний політехнічний університет, Одеса

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СЕТЕВОГО ИСЧИСЛЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ

В работе предложен новый подход к моделированию программно-конфигурируемых сетей, основной особенностью которого является возможность моделирования граничных показателей качества обслуживания с учетом динамического изменения состояний сетевой инфраструктуры во времени и последующим анализом результатов посредством математического аппарата теории сетевого исчисления. Приведены примеры моделирования поведения программно-конфигурируемой сети с учетом интенсивности входящих запросов, а также разных методов передачи данных: с агрегацией и без агрегации потоков данных. Приведены математические выражения для расчета изменения значений показателей задержки и интенсивности обработки входящих запросов на программно-конфигурируемом коммутаторе.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети, теория сетевого исчисления, задержка, производительность, OpenFlow коммутатор.

Введение

Анализ механизмов предоставления сервисов в программно-конфигурируемых сетях (Software-Defined Networking, SDN) показал, что вопросам обеспечения гарантированного качества обслуживания (Quality of Service, QoS) пользовательских потоков данных уделено недостаточное внимание: в существующих спецификациях и рекомендациях описаны функциональные критерии, методы взаимодействия элементов SDN и операции между ними [1-3]. В то время, как нефункциональные требования к работе сети, методы поддержки гарантированного качества обслуживания и обеспечения требуемого уровня производительности сервисов точно не определены. В связи с сложившейся ситуацией, задача развития методов анализа и формирования корректной оценки нефункциональных требований, в том числе и динамического изменения показателей QoS, в программно-конфигурируемых сетях является актуальной.

В качестве метода оценки динамического изменения состояния программно-конфигурируемых сетей, которые влияют на результирующие показатели качества, в работе предлагается использовать теорию сетевых исчислений (network calculus) [4-7]. В основе данной теории лежит идея формирования детерминированных оценок показателей качества путем анализа граничных сценариев функционирования отдельных фрагментов сети и комбинирования этих сценариев между собой.

Так, теория сетевого исчисления позволяет формализовать временные зависимости обработки

агрегированного потока данных в случае композиции нескольких элементов, что трудно достигнуть с помощью использования других методов. Теория сетевого исчисления позволяет оперировать как точными значениями сетевых характеристик, так и определять их пороговые значения [4-6]. Подобный подход может быть использован для расчета наилучших показателей качества предоставления услуг, или, наоборот, для определения минимальных требований к элементам сетевой инфраструктуры, что является важной практической задачей при разработке и совершенствовании систем управления программно-конфигурируемыми сетями.

Теория сетевого исчисления как методология анализа производительности нашла широкое применение при проектировании и внедрении сетевых решений с поддержкой гарантированного уровня качества обслуживания, в частности с поддержкой механизмов IntServ или DiffServ [7, 8]: беспроводных сенсорных сетях [9], сетях, функционирующих на основе технологии Ethernet [10, 11], технологии ATM и др.

В работе [12] предложено применение теории сетевого исчисления для оценки показателей задержки в SDN, но при этом охватывается лишь частный случай наличия только одного OpenFlow коммутатора. В работе [13] элементы теории сетевого исчисления применяются при моделировании процесса функционирования SDN контроллера и последующего анализа его производительности, однако исследование ограничено взаимодействием типа «контроллер-коммутатор».

1. Применение теории сетевого исчисления при моделировании программно-конфигурируемых сетей

1.1. Основные положения и определения

Модель программно-конфигурируемой сети в соответствии с основами теории сетевого исчисления включает следующие элементы:

1. Узлы-обработчики. К такому типу узлов относятся OpenFlow коммутаторы и SDN контроллеры [14]. Спецификацию узла-обработчика формируют такие характеристики как максимальная суммарная скорость обработки потока данных R , усредненная скорость обработки отдельного потока r , объем входного буфера q и дисциплина обслуживания Q . Производительность $P(t)$ узла обработчика оценивается с помощью кривой сервиса $b(t)$ и функции отправления $D(t)$.

Характерным для моделирования SDN является то, что узел-обработчик может быть представлен одним физическим устройством сети (коммутатором) или их объединением (структурой коммутатор-контроллер-коммутатор).

2. Узлы-потребители. Оконечное оборудование потребителей сервиса, генерирующие запросы на предоставление услуг.

3. Поток данных. Под потоком данных может подразумеваться либо микро-поток [4], сформированный в процессе взаимодействия узла-потребителя и узла-обработчика либо агрегированный поток [6], как правило, формируемый в процессе взаимодействия между узлами-обработчиками. Для каждого типа потока формируется собственная кривая нагрузки $\alpha(t)$ [4, 7]. При формировании кривой нагрузки учитываются следующие характеристики: пиковая интенсивность поступления данных p , изменение интенсивности потока b , максимального размера пакетов данных M и усредненная, характерная для каждого потока, интенсивность поступления данных r . Множество (p, r, M, b) формирует спецификацию потока данных T-SPEC [15]. Таким образом, кривая нагрузки всегда определена и может быть представлена выражением вида

$$\alpha(t) = \min(M + pt, rt + b).$$

При моделировании обработчиков и потоков данных в теории сетевого исчисления применяются накопительные функции и кривые, которые выражают общее количество информации, переданной или обработанной моделируемыми элементами с момента начала отсчета [4, 8]. Ниже приведено детальное представление элементов теории сетевого исчисления, которые применяются в процессе моделирования SDN [16].

Кривая нагрузки (arrival curve) $\alpha(t)$ – это возрастающая функция, которая характеризует текущее значение объема поступающих данных в опреде-

ленный момент времени на узел-обработчик N [4]. Построение кривой нагрузки может осуществляется «кусочно» в соответствии с выделенными временными интервалами:

$$\alpha(\tau) = R(t_1) - R(t), \quad (1)$$

где $R(t_1)$ – объем данных, поступивших на узел-обработчик в момент времени t_1 , $R(t)$ – объем данных, поступивших на узел-обработчик в момент времени t .

Кривая обслуживания (service curve) $\beta(\tau)$ – это возрастающая функция, определяющая отклонение текущего объема обработанных данных от объема данных, обработанных узлом-обработчиком за предыдущий момент времени [4]:

$$\beta(\tau) = R' \alpha(t_1) - R' \alpha(t), \quad (2)$$

где $R' \alpha(t_1)$ – объем данных, обработанных узлом-обработчиком в момент времени t_1 , $R' \alpha(t)$ – объем данных, обработанных узлом-обработчиком в момент времени t .

Функцией прибытия потока данных называется такая накопительная функция $A(t)$, которая описывает зависимость суммарного количества данных, поступивших $A(t)$ на узел-обработчик N в определенные моменты времени [15].

Функцией отправления потока данных называется такая накопительная функция $D(t)$, которая описывает зависимость суммарного количества данных, обработанных узлом-обработчиком N в определенные моменты времени.

Производительность каждого узла-обработчика может быть описана количеством пар вида $\langle \alpha(\tau), \beta(\tau) \rangle$ и $\langle A(t), D(t) \rangle$. При этом значение, полученное от пары $\langle \alpha(\tau), \beta(\tau) \rangle$ является граничным – позволяет учитывать наихудшее или наилучшее значение функционирования сети, а $\langle A(t), D(t) \rangle$ – определить фактическое значение задержки и отставания в определенный момент времени.

Отставанием (backlog) $b(t)$ называется зависимость объема хранящихся на узле-обработчике N данных, принадлежащих одному потоку от времени. Отставание представляется в виде разности функций прибытия A и отправки D обслуживаемого им потока данных [15]:

$$b(t) = A(t) - D(t). \quad (3)$$

Объем буфера, как контроллера, так и коммутатора, характеризуется значением отставания. При анализе кривых прибытия и обслуживания кривая, характеризующая изменение значения отставания, может быть представлено с помощью следующего формализма:

$$\forall t : b(t_1) \leq \alpha(t_1) \otimes \beta(t_1) =: v(\alpha(t_1), \beta(t_1)). \quad (4)$$

В случае анализа кривой прибытия и кривой обслуживания кривая задержки может быть представлено следующим образом [4]:

$$\forall t : d \leq \leq \sup_{\Delta > 0} \{ \inf \{ t \geq 0 : \alpha(t_i) \geq \beta(t_i) \} \} =: h(\alpha(t_i), \beta(t_i)). \quad (5)$$

1.2. Особенности моделирования программно-конфигурируемых сетей

Программно-конфигурируемая сеть представлена двухуровневой архитектурой: уровнем доступа, который характеризуется параметрами коммутатора и уровнем управления, который характеризуется параметрами контроллера. Основной ее особенностью является формирование агрегированных потоков данных. Агрегация осуществляется в соответствии со значением поля ToS входящего трафика [17]. Агрегирование потоков данных осуществляется как

на OpenFlow коммутаторах, так и на промежуточных устройствах сети – FlowVisor. Как FlowVisor, так и коммутатор осуществляют перечень возможных действий лишь на основе управляющих сообщений, полученных от контроллера. Структурная схема фрагмента SDN (взаимодействие типа «контроллер-коммутатор») приведена на рис. 1.

Кривая производительности узла-обработчика для каждого микро-потока *i* в зависимости от его приоритета может быть задана следующим образом:

$$r_i = \left(\phi_i R_N / \sum_{j=0}^n \phi_j \right) \cdot P_N(t), \quad (7)$$

где ϕ_i , ϕ_j - удельный вес (приоритет) каждого потока при обслуживании узлом-обработчиком, $P_N(t)$ – текущее значение производительности (CPU) узла-обработчика, R_N - общая скорость обработки.

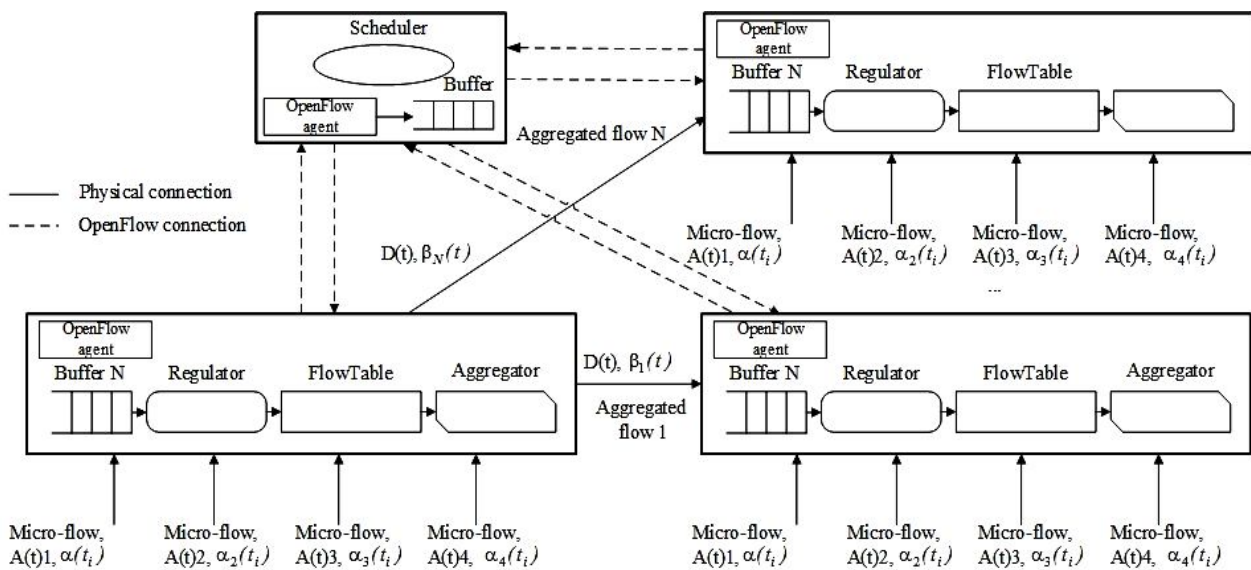


Рис. 1. Структурная схема фрагмента программно-конфигурируемой сети с учетом агрегирования потоков данных

Кривая обслуживания программно-конфигурируемой сети формируется с помощью уравнения:

$$\beta(\tau) = \sum_{k=1}^n \beta_k(\tau), \forall \tau > 0, \quad (8)$$

где $\beta_k(\tau)$ - кривая обслуживания, формируемая каждым отдельным входящим потоком данных, *n* - количество входящих потоков.

В соответствии с (7) и (8) кривая обслуживания для микро-потока может быть сформирована с помощью следующего уравнения:

$$\beta_i(\tau) = \beta(\tau) - \sum_{k=1, k \neq i}^n \alpha_k(\tau - \tau_k), \quad \forall \tau > 0, \tau > \tau_k > 0 \quad (9)$$

где $\sum_{k=1, k \neq i}^n \alpha_k(\tau - \tau_k)$ – суммарная кривая нагрузки для входящих микропотоков, за исключением потока *i*, τ_k - время запаздывания, вносимое при обработке узлом суммарного потока $\alpha_k(\tau)$.

Выходящая из узла-обработчика кривая нагрузки, которая в последующем будет применена как входящая кривая нагрузки для дальнейших узлов-обработчиков может быть представлена как [4]:

$$\alpha^*(\tau) = \begin{cases} b + r(|D(t)| + t) & \text{при } \frac{b - M/t}{p - r} \leq T_h; \\ \min \left\{ R(|D(t)| + t) + \frac{b - M/t}{p - r} (p - R)^+, \right. \\ \quad \left. b + r(|D(t)| + t) \right\} & \\ \quad \quad \quad \text{при } \frac{b - M/t}{p - r} \geq T_h. \end{cases} \quad (10)$$

Допущения, применяемые при моделировании: в качестве регулятора рассмотрен регулятор типа Leaky Bucket [4, 17, 18]. OpenFlow коммутаторах используется дисциплина обслуживания First In First Out [4, 18].

2. Моделирование временных характеристик программно-конфигурируемой сети, влияющих на показатели QoS

2.1. Построение модели узла-обработчика

В соответствии с особенностями SDN OpenFlow коммутатор может передавать данные без обращения к контроллеру. Данная ситуация возможна при наличии совпадений полей пришедшего на коммутатор пакета и полей таблицы переадресации (FlowTable). В этом случае значение кривой обслуживания рассчитывается в соответствии с формулой (9), значение входящей кривой нагрузки – (1) и исходящей кривой нагрузки – (10)

Верхнее граничное значение задержки вычисляется следующим образом:

$$d = \alpha(t_i) - \beta(t) = (rt + b) - \frac{\sum_{k=1}^l b_k}{R - \sum_{k>l} r}. \quad (11)$$

Верхнее значение длины буфера при определенных характеристиках коммутатора может быть рассчитано следующим образом:

$$b_i = \sum_{k=1}^n (b_k + r_k t) - (R - \sum_{k=1, k \neq i}^n r_k) t. \quad (12)$$

Если OpenFlow коммутатор осуществляет перенаправление входящего запроса от узла-потребителя контроллеру, то значение кривой обслуживания изменяется. В этом случае имеет место следующая формула:

$$\beta(\tau_+) = [\beta_c(\tau_+) - \sum_{k=1}^l \alpha^*(\tau)]^+, \quad (13)$$

где τ_+ - временной интервал с учетом получения ответа от контроллера, как правило $\tau_+ \equiv \tau$, т.е. время обработки OpenFlow запроса контроллером ничтожно мало, $\beta_c(\tau_+)$ - кривая обслуживания контроллера, $\sum_{k=1}^l \alpha^*(\tau)$ - выходящая из узла-обработчика кривая нагрузки.

Максимальное значение задержки может быть рассчитано следующим образом:

$$d = \sup \left\{ \sum_{k=1}^n \alpha_k(\tau) - [\beta_c(\tau_+) - \sum_{k=1}^l \alpha^*(\tau)]^+ \right\} = \frac{\sum_{k=1}^l b_k}{R - \sum_{k=1, k \neq i}^n \sum_{k=i}^l r_k} + \frac{\sum_{k=1, k \neq i}^n \sum_{k=i}^l b_k}{R_c} + (\tau - \tau_+). \quad (14)$$

Значение кривой нагрузки, исходящей из узла-обработчика, рассчитывается так [2, 19]:

$$\alpha(\tau) = \overline{Sp}(\alpha^0(\tau) \otimes \beta^0(\tau)) + \beta_c(\tau), \quad (15)$$

где \overline{Sp} - коэффициент масштабирования, полученный на основе работы регулятора.

Предположим, что значение запаздывания и максимальная длина буфера не зависят от наличия обратной связи.

2.2. Модели SDN взаимодействия нескольких узлов обработчиков

Пусть поток проходит через несколько узлов-обработчиков. Общий фрагмент сети состоит из N узлов-обработчиков. Каждый обработчик определен индивидуальным набором характеристик, влияющих на его производительность.

Предположим, что в качестве регулятора потока данных на каждом узле-обработчике применим регулятор Leaky Bucket и выходящая из узла-обработчика кривая нагрузки характеризуется уравнением (12) дисциплина обслуживания - First In First Out [20].

В процессе моделирования рассмотрен агрегированный поток, соответствующий определенному классу обслуживания. В соответствии с [4, 7] суммарная кривая обслуживания задается выражением вида $\beta(\tau) = \beta_1(\tau) \otimes \beta_1(\tau) \otimes \dots \otimes \beta_N(\tau)$.

Кривая обслуживания каждого последующего узла обработчика подчиняется следующей закономерности:

$$\begin{aligned} \beta^0(\tau) &= [\beta(\tau) - \sum_{k=1}^N \alpha^{(k)}]^+; \\ \beta^1(\tau) &= [\beta(\tau) - \sum_{k=2}^N \alpha^{(k)}]^+; \\ &\dots \\ \beta^N(\tau) &= [\beta(\tau) - \sum_{k=2}^N \alpha^{(k)}]^+, \end{aligned} \quad (16)$$

где кривая нагрузки, выходящая из каждого узла-обработчика определена следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha^0(\tau) &= \alpha(\tau); \\ \alpha^1(\tau) &= \overline{Sp}_1(\alpha^0(\tau) \otimes \beta^0(\tau)) + \beta_c(\tau); \\ &\dots \\ \alpha^N(\tau) &= \overline{Sp}_N(\alpha^{(N-1)}(\tau) \otimes \beta^{(N-1)}(\tau)) + \beta_c(\tau). \end{aligned} \quad (17)$$

Значение задержки «из конца в конец» в этом случае может быть рассчитано при помощи следующего уравнения:

$$\begin{aligned} d &= \left((rt + b) - \sum_{k=0}^l b_k / \left(R - \sum_{k>l} r_0 \right) \right) + \\ &+ \left(\alpha^1(\tau) - \sum_{k=1}^l b_k / \left(R - \sum_{k>l} r_1 \right) \right) + \\ &+ \left(\alpha^2(\tau) - \sum_{k=2}^l b_k / \left(R - \sum_{k>l} r_2 \right) \right) + \dots + \\ &+ \left(\alpha^N(\tau) - \sum_{k=N}^l b_k / \left(R - \sum_{k>l} r_N \right) \right). \end{aligned} \quad (18)$$

и не может превышать следующего значения:

$$\forall t : d = \sup \left\{ \sum_{k=1}^N \alpha_k(\tau) - [\beta_c(\tau_+) - \sum_{k=1}^N \alpha^N(\tau)]^+ \right\}. \quad (19)$$

Значение буфера каждого узла обработчика при этом остается постоянным.

Таким образом, приведенная математическая модель, основанная на теории сетевого исчисления, позволяет рассчитать и проанализировать граничные значения задержки, объема входного буфера для каждого обслуживающего устройства.

Выводы

В статье предложен новый подход к моделированию программно-конфигурируемых сетей, позволяющий оценить сетевые характеристики, влияющие на показатели QoS. Предложена модель фрагмента сети, учитывающая взаимосвязь «контроллер-коммутатор». Особенностью предложенной сети является учет обратной связи, которая обуславливается функционированием протокола OpenFlow. Приведены формулы для расчета таких показателей как производительность узла, характеризующаяся кривой обслуживания, задержка и объем данных, хранящихся в буфере.

На основе частной модели сети предложена модель расчета граничных показателей задержки и производительности «из конца в конец» при наличии нескольких узлов-обработчиков. Данная модель предполагает наличие одного агрегированного потока данных, однако на базе уравнений (11)-(15) может быть предложено ее дальнейшее развитие, позволяющее моделировать поведение узлов-обработчиков в случае формирования нескольких агрегированных потоков данных. Таким образом, предложенный подход может быть использован при разработке и совершенствовании существующих мультисервисных программно-конфигурируемых сетей.

Список литературы

1. Haleplidis E. *Software-Defined Networking: Experimenting with the Control to Forwarding Plane Interface // European Workshop on Software Defined Networks (EWSND), Darmstadt, Germany, 25–26 Oct. 2012., P. 91–96.*
2. Lawrence S. *Software Engineering: Theory and Practice (2nd ed.)*. NJ: Prentice Hall, 2001. 630 p. 3. Infonetics Research, Inc. *SDN and NFV Strategies: Global Service Provider Survey, 2014, 39 c.* <http://alu.us.neolane.net/res/img/286758382c7e061c52883e873cee02e6.pdf>.
4. Boudec J.-Y. Le, Thiran P. *Network calculus. A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet // Springer Verlag, 2012. 263 p.*
5. Cruz R. L. *A calculus for network delay, Part II: Network analysis. IEEE Transactions on Information Theory, Vol 37(1), 1991. pp. 132–141.* 6. Ciucu F., Burchard A., Liebeherr J. *A network service curve approach for the stochastic analysis of networks // ACM SIGMETRICS, 2005, P. 279–290.* 7. Chang C.-S. *On deterministic traffic regulation and service guarantees: A systematic approach by filtering // IEEE Transactions on Information Theory, Vol 44(3), 1998, P. 1097–1110.* 8. Chang C.-S. *Performance Guarantees in Communication Networks. Telecommunication Networks and Computer Systems. Springer-Verlag, 2000. 365 p.* 9. Schmitt J., Roedig U. *Sensor network calculus - a framework for worst case analysis // Distributed Computing on Sensor Systems, 2006. P. 141–154.* 10. Skeie T., Johannesen S., Holmeide O. *Timeliness of real-time IP communication in switched industrial ethernet networks // IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol 2(1), 2006. P. 25–39.* 11. Cruz R. L. *Quality of service guarantees in virtual circuit switched networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 13(6), 2007, P.1048–1056.* 12. Shang Z., Wolter K. *Delay Evaluation of OpenFlow Network Based on Queueing Model: https://www.researchgate.net/publication/306397961_Delay_Evaluation_of_OpenFlow_Network_Based_on_Queueing_Model.* 13. Bing Xiong, Kun Yangb, Jinyuan Zhaoc, Wei Lia, Keqin Lid. *Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model // Computer Networks, Vol. (102), 2016, P. 172–185.* 14. Issam S. *Mathematical models for analysis Software-defined network // International Journal "Information Technologies & Knowledge". Vol. 9 (2). 2015. P.111 – 123.* 15. Jiang Y. *Relationship between guaranteed rate server and latency rate server // IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '02). Vol. 3., 2002. P. 2415–2419.* 16. The ATM Forum. Technical Committee. // *Traffic Management Specification. Version 4.1 AF-TM-0121.000.* 17. Bianco A., Birke R., Giraudo L. *Openflow switching: Data plane performance // Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010, pp. 1–5.* 18. Zhang H., Ferrari D. *Rate controlled service disciplines // Journal of High Speed Networks, Vol 4, 1994, P. 389–412.* 19. Zhang Z.-L., Duan Z. *Fundamental trade-offs in aggregate packet scheduling // In SPIE Vol. 4526, 2001.* 20. Fidler M., Schmitt J. *On the way to a distributed systems calculus: An end-to-end network calculus with data scaling // ACM SIGMETRICS/Performance, 2006, P. 287–298.*

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.В. Агеев, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ МЕРЕЖЕВОГО ОБЧИСЛЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ

Є.В. Дуравкін, О.Б. Ткачева, Х.М. Мухі-Алдіні

Запропоновано новий підхід до моделювання програмно-конфігурованих мереж, що дозволяє оцінити зміну мережових характеристик, які впливають на показники якості обслуговування. Запропоновано модель фрагменту програмно-конфігурованої мережі, що відображає взаємозв'язок «контролер-коммутатор».

Ключові слова: програмно-конфігуровані мережі, теорія мережевого розрахунку, затримка, продуктивність, OpenFlow комутатор.

THE APPLICATION OF THE NETWORK CALCULUS THEORY FOR SOFTWARE-DEFINED NETWORKING MODELING

Ye.V. Duravkin, O.B. Tkacheva, Kh.M. Muhi-Aldin

A new approach to the software-defined networking modeling that give the ability to evaluate network characteristics and quality of service indicators is proposed in the article. The model of a network fragment in term of network calculus theory that takes into account the interconnection "controller-switch" is considered.

Keywords: software-configurable networks, the theory of network calculus, delay, pro-conductivity, OpenFlow switch.

УДК 004.056.53

Кассем Халіфе¹, Г.Я. Криховецький², Г.А. Кучук¹¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків² Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації

НТУ України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ

ОЦІНКА ВРАЗЛИВОСТІ СИСТЕМНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У статті запропонована методика оцінки вразливості системного програмного забезпечення. Теоретична частина методики базується на методі динаміки середніх. Відмінною особливістю розробленої методики є врахування можливості масштабування процесу розробки програмного забезпечення шляхом впровадження фахівців з безпеки (PersonNon, SecDev) без суттєвої зміни ефективності розробки. На прикладі стратегії, прийнятої при імітаційному моделюванні, проведено дослідження і доведена доцільність використання додаткових фахівців з безпеки.

Ключові слова: системне програмне забезпечення, безпека, вразливість, кібербезпека.

Вступ

Постановка завдання. Проведені дослідження показали, що в даний час існують об'єктивні причини появи вразливостей в системному програмному забезпеченні (СПЗ), які полягають в надзвичайно високій структурній складності програмного коду, динамічності розвитку версій і відносній легкості модифікації коду [7 – 10]. До цього можна додати ряд проблем, пов'язаних з недосконалістю політик безпеки програмного забезпечення і недоліками тестування безпеки.

Дані фактори негативно впливають на процеси життєвого циклу програмного забезпечення і призводять до збільшення кількості успішно проведених кібератак на комп'ютерні системи в цілому.

Одним з актуальних питань, пов'язаних із захистом СПЗ, залишається оцінка його уразливості.

Аналіз літератури [1 – 10] показав, що, незважаючи на представлені теоретичні пропозиції, так і не забезпечено розробку математичного апарату для оцінки ступеня уразливості і безпеки програмного забезпечення. При цьому ряд експертів висуває припущення про неможливість визначення точних кількісних даних уразливості і безпеки СПЗ.

Тому широкого поширення набули методи якісної оцінки (наближені методи) оцінки вразливості СПЗ. Однак точність і адекватність такої оцінки залежить від ряду суб'єктивних факторів і з огляду на множини існуючих невизначеностей вхідних даних залишається низькою.

Мета статті. Розробити методику кількісної оцінки вразливості СПЗ, засновану на методі динаміки середніх, що отримав теоретичне обґрунтування в роботах [5, 6].

Результати досліджень

Основні положення методу динаміки середніх лягли в основу розробленої імітаційної моделі (рис. 1).

Методика передбачає виконання таких кроків.

Крок 1. Аналіз ймовірних загроз системному програмному забезпеченні. Змістовна постановка задачі дослідження.

Крок 2. Розробка операційної схеми для дослідження динамічної системи «СПЗ – ЗЛОВМИСНИК».

Блок 3. Складання рівнянь для станів в диференціальній формі відповідно до методу динаміки середніх.

Крок 4. Завдання вихідних даних, початкових і додаткових умов для вирішення завдання.

Крок 5. Чисельне рішення задачі, фіксація і апроксимація результатів моделювання.

Крок 6. Обчислення показників ефективності методу розробки системного ПЗ.

Кількісно ефективність розробленого методу можна визначити за допомогою показника втрат ΔZ_i по кожному засобу z_i . Цей показник визначає величину відносного збитку, нанесеного засобу z_i в результаті злочинних атак на ПЗ. При цьому, відповідно до робіт [8, 9], показник відносної шкоди може бути обчислений за формулою:

$$\Delta Z_i(t^*) = \frac{z_i(t_0) - z_i(t^*)}{z_i(t_0)} \cdot 100\%, \quad i = 1 \dots n, \quad (1)$$

де t^* - поточний момент часу (момент виходу з циклу моделювання процесу); $\Delta Z_i(t^*)$ - відносний збиток для засобу z_i на момент часу t^* ; $z_i(t_0)$ - вихідний потенціал засобу z_i в момент часу t_0 ; n - кількість фазових координат (розмірність вектора z) динамічної системи «СПЗ - ЗЛОВМИСНИК».

Крок 7. Аналіз та узагальнення результатів моделювання і підготовка рекомендацій щодо вибору структури методології розробки системного ПЗ і стратегії її використання в фірмах.

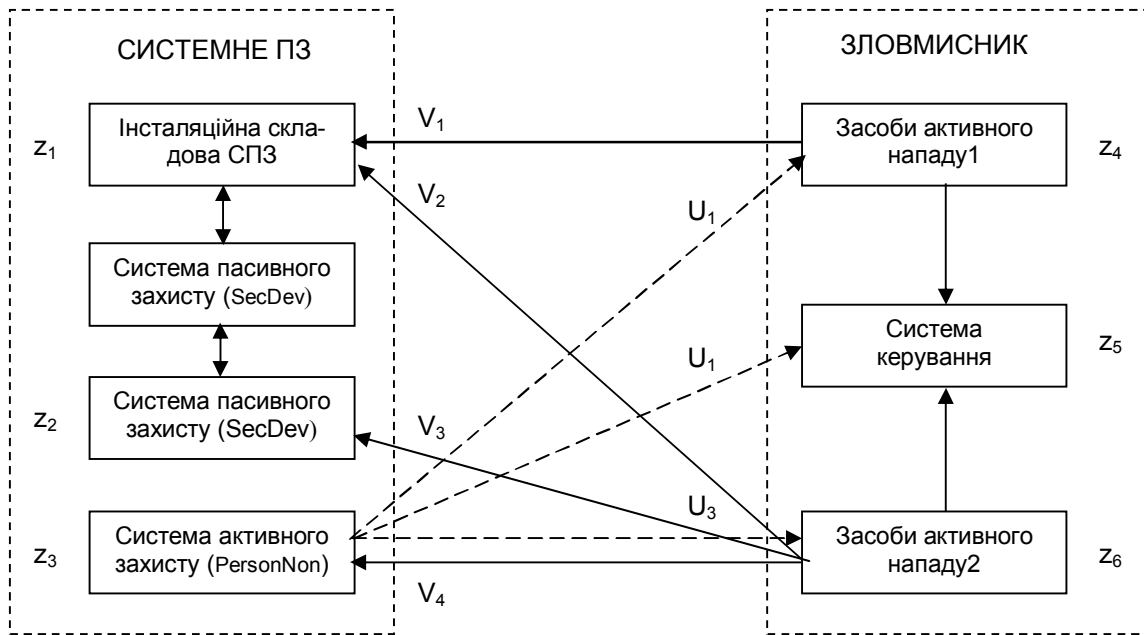


Рис. 1. Структура імітаційної моделі динамічної системи «СПЗ – ЗЛОВМИСНИК»

Обчислювальний експеримент з розробленою в середовищі MathCad програмою дозволяє для заданих умов реалізувати імітаційну модель процесу взаємодії системного ПЗ, як об'єкта нападу, і зловмисника та отримати оцінки показників ефективності використання розробленого методу. У представленій на рис. 1. моделі введемо допущення про використання засобів пасивного захисту для виявлення, локалізації та відновлення пошкоджених інформаційних та інших елементів системного ПЗ.

Для формалізованого представлення динамічної системи «СПЗ - ЗЛОВМИСНИК» введемо змінні $z_i, i = 1...6$, під якими будемо розуміти відповідно чисельності станів таких елементів: інсталяційних складових системного ПЗ, бази даних і засобів активного захисту ПЗ, засобів активного нападу першого типу, системи управління і засобів активного нападу другого типу зловмисника.

Стан динамічної системи «СПЗ - ЗЛОВМИСНИК» в цілому в кожен момент часу $t \in [t_0, t_N]$ характеризується системою звичайних лінійних диференціальних рівнянь (2), в якій в якості змінних розглядаються чисельності станів $z_i, i = 1...6$, а $\delta z_1 \gamma_1(z_1, Z_1^*)$ – введення додаткових ресурсів (спеціалістів) для підвищення безпеки z_1 ; $\delta z_2 \gamma_2(z_2, Z_2^*)$ – введення додаткових ресурсів (фахівців) для підвищення безпеки z_2 ; Z_1^* і Z_2^* – порогові значення чисельностей станів z_1 і z_2 відповідно, починаючи з яких вводиться резерв зі складу системи пасивного захисту; δz_1 і δz_2 – інтенсивності введення резервних засобів до складу z_1 і z_2 ;

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = \bar{z}_1(t) = -\lambda_4 p_{14} v_1 z_4 - \lambda_6 p_{16} v_2 z_6 + \delta z_1 \gamma_1(z_1, Z_1^*); \\ \frac{dz_2}{dt} = \bar{z}_2(t) = -\lambda_6 p_{26} v_3 z_6 + \delta z_2 \gamma_2(z_2, Z_2^*); \\ \frac{dz_3}{dt} = \bar{z}_3(t) = -\lambda_6 p_{36} v_4 z_6; \\ \frac{dz_4}{dt} = \bar{z}_4(t) = -\lambda_3 p_{43} u_1 z_3; \\ \frac{dz_5}{dt} = \bar{z}_5(t) = -\lambda_3 p_{53} u_2 z_3; \\ \frac{dz_6}{dt} = \bar{z}_6(t) = -\lambda_3 p_{63} u_3 z_3, \end{cases} \quad (2)$$

де $\gamma_1(z_1, Z_1^*)$ і $\gamma_2(z_2, Z_2^*)$ сигнальні функції, які визначаються за формулами:

$$\gamma_1(z_1, Z_1^*) = \begin{cases} 1, & \text{если } z_1(t) \leq Z_1^*; \\ 0, & \text{если } z_1(t) > Z_1^*. \end{cases}$$

$$\gamma_2(z_2, Z_2^*) = \begin{cases} 1, & \text{если } z_2(t) \leq Z_2^*; \\ 0, & \text{если } z_2(t) > Z_2^*. \end{cases}$$

Відповідно до правил рішення [5], введемо змінні $A_k, k = 1...8$, для позначення коефіцієнтів диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} A_1 &= -\lambda_4 p_{14} v_1; \quad A_2 = -\lambda_6 p_{16} v_2; \quad A_3 = 0; \\ A_4 &= -\lambda_6 p_{26} v_3; \quad A_5 = -\lambda_6 p_{36} v_4; \quad A_6 = -\lambda_3 p_{43} u_1; \\ A_7 &= -\lambda_3 p_{53} u_2; \quad A_8 = -\lambda_3 p_{63} u_3, \end{aligned}$$

де $\lambda_i, i = 1...6$ – інтенсивності атак, які виконуються засобами $z_i, i = 1...6$ відповідно; $p_{i,j}$ – ймовірність проникнення (злomu) в системне ПЗ або окрему її складову (наприклад, базу даних) z_i в резуль-

таті атаки із боку засобу z_j ; u_1 , u_2 та u_3 – коефіцієнти, що характеризують ступінь використання тестувальників вразливостей СПЗ (Person Non); v_1 , v_2 та v_3 – коефіцієнти, що характеризують зусилля зловмисників, що долають захист системного ПЗ;

Після перетворень системи (2) отримаємо:

$$\begin{cases} \bar{Z}_1(t) = A_1 z_4 + A_2 z_6 + \delta z_1 \gamma_1(z_1, Z_1^*); \\ \bar{Z}_2(t) = A_3 z_6 + \delta z_2 \gamma_2(z_2, Z_2^*); \\ \bar{Z}_3(t) = A_4 z_6; \\ \bar{Z}_4(t) = A_5 z_3; \\ \bar{Z}_5(t) = A_6 z_3; \\ \bar{Z}_6(t) = A_7 z_3, \end{cases} \quad (3)$$

де $\gamma_k(t)$ – сигнальна функція, що дозволяє обрати інтервал введення резерву $\Delta t_{\text{доп}}$ (фахівців кібербезпеки) для поповнення засобів $z_1(t)$ і $z_2(t)$.

Співвідношення $u_1 / u_2 / u_3 = a / b / c$ визначають стратегію розробників СПЗ в відбитті атак зловмисників: v_1 - частка (%) засобів z_4 з боку зловмисників, які беруть участь в інформаційному придушенні засобів z_1 розробника СПЗ, причому повинна виконуватися умова: $v_1 \leq 1$; v_2 , v_3 , v_4 – частки (в %) засобів з боку зловмисників, які беруть участь в інформаційному придушенні засобів z_1 , z_2 і z_3 , сторони розробника СПЗ відповідно; при цьому повинна виконуватися умова: $v_2 + v_3 + v_4 \leq 1$; r_{ij} , $i, j = \overline{1, 6}$ – ймовірність виведення з ладу засоби i -го типу засобом j -го типу.

При імітаційному моделюванні необхідно ввести додаткові умови:

1. Фахівці кібербезпеки в стані z_1 використовуються при $z_1(t) \leq 80\% z_1(t_0)$, в стані z_2 використовуються при $z_2(t) \leq 90\% z_2(t_0)$.

2. Кожен з блоків z_i , $i = \overline{3, 6}$, має тільки два стани: працездатний та непрацездатний.

3. Вхідні дані імітаційної моделі прийняті такі:

$$\begin{aligned} z_1(t_0) = z_2(t_0) = 100; \quad z_3(t_0) = z_5(t_0) = 100\%; \\ z_4(t_0) = z_6(t_0) = 50. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_3 = 0,12 \text{год}^{-1}; \quad \lambda_4 = 0,15 \text{год}^{-1}; \quad \lambda_6 = 0,21 \text{год}^{-1}; \\ \delta z_1 = 0,25 \text{год}^{-1}; \quad \delta z_2 = 0,15 \text{год}^{-1}. \end{aligned}$$

4. З урахуванням проведених досліджень і експертних оцінок фахівців фірм-розробників СПЗ прийняті фіксовані стратегії $\{u\}$ та $\{v\}$ сторін СПЗ і ЗЛОВМИСНИК:

$$\begin{aligned} u_1 = u_2 = 0,3; \quad u_3 = 0,25; \\ v_1 = 0,5; \quad v_2 = 0,25; \quad v_3 = 0,35; \quad v_4 = 0,4. \end{aligned}$$

Значення ймовірностей виведення з ладу однієї одиниці СПЗ або засобів зловмисників прийнято відповідно до даних табл. 1.

Таблиця 1

Значення ймовірностей виведення з ладу однієї одиниці СПЗ і засобів зловмисників

СПЗ				ЗЛОВМИСНИК		
P14	P16	P26	P36	P43	P53	P63
0,1	0,08	0,09	0,03	0,08	0,125	0,06

5. Моделювання (чисельне рішення) диференціальних рівнянь (2) виконано в циклі на інтервалі часу від 0 до 180 годин із кроком 6 хвилин.

6. Обмеженнями моделювання, при яких неможливо продовження заданої програми є випадки коли $z_1 \leq 1$; $z_2 \leq 1$; $z_3 \leq 10\%$; $z_4 \leq 1$; $z_5 \leq 10\%$; $z_6 \leq 1$. Обчислимо відносний збиток $\Delta Z_i(t^*)$ для всіх z_i , де $i = 1, \dots, 6$. Результати обчислень представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Відносний збиток $\Delta Z_i(t^*)$ для всіх z_i при $t^* = 120$ годин

СПЗ			ЗЛОВМИСНИК		
$\Delta Z_1(t^*)$	$\Delta Z_2(t^*)$	$\Delta Z_3(t^*)$	$\Delta Z_4(t^*)$	$\Delta Z_5(t^*)$	$\Delta Z_6(t^*)$
29,57	18,31	11,99	64,57	50,45	40,36

Результати імітаційного моделювання, представлені у вигляді кривих на графіках рис. 2, дозволяють проаналізувати динаміку протистояння СПЗ-ЗЛОВМИСНИК.

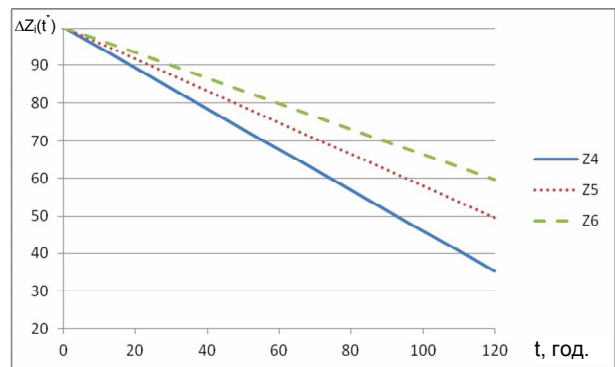
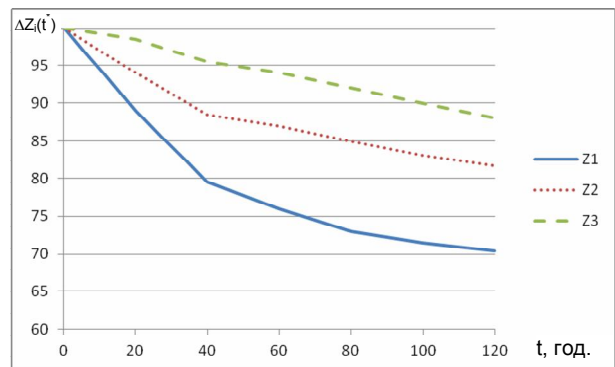


Рис. 2. Динаміка змін $\Delta Z_i(t^*)$

У розглянутому прикладі результати імітаційного моделювання свідчать про доцільність та ефективність реалізованої в моделі системи захисту і, одночасно, про можливість нейтралізації засобів атакуючої сторони (використовуючи активні і пасивні методи захисту).

Оцінити ефективність розробленого методу можна по кривих графіків рис. 3.

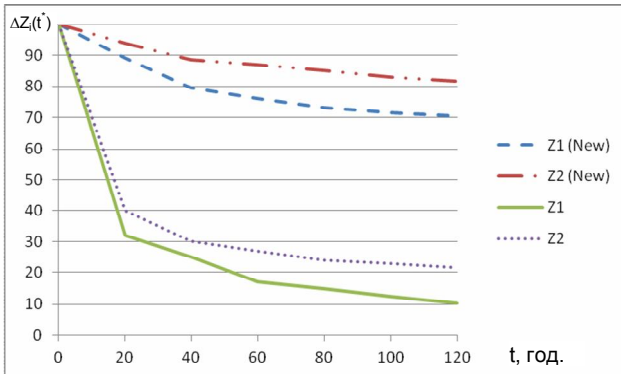


Рис. 3. Динаміка змін $\Delta Z_i(t^*)$ для систем із SecDev та Person Non, а також без них

Як видно з графіків рис. 1–3 використання розробленої методики масштабування процесу розробки СПЗ з урахуванням вимог безпеки знижує показник відносного збитку на всіх етапах життєвого циклу ПЗ до 6 разів, в залежності від можливої тривалості атаки.

ВИСНОВКИ

Таким чином, вдосконалена методика оцінки вразливості системного ПЗ. Її відмінною рисою є врахування можливості масштабування процесу розробки програмного забезпечення шляхом впровадження фахівців безпеки (PersonNon, SecDev). Це дозволить провести кількісну оцінку вразливості СПЗ з урахуванням існуючих вимог безпеки розробки програмного забезпечення. Надалі розроблена методика дозволить провести оцінку достовірності

результатів імітаційного моделювання при аналізі методу масштабування процесу розробки програмного забезпечення.

Список літератури

1. ISO/IEC «Информационная технология Методы и средства обеспечения безопасности - Критерии оценки безопасности ИТ - Часть 1: Введение и общая модель». ISO/IEC JTC 1/SC27 №2738, 02.2001 г.
2. ISO/IEC 15408 3: 1999 «Информационная технология - Методы и средства обеспечения безопасности - Критерии оценки безопасности ИТ -Часть 3: Гарантийные требования безопасности».
3. ISO/IEC PDTR 15446 «Информационная технология Методы и средства обеспечения безопасности - Руководство по разработке профилей защиты и заданий по безопасности», ISO/IEC JTC 1/SC27 №2603 dra, 04.2001 г.
4. ISO 9001:1994 «Системы качества Модель для гарантии качества в проектировании, разработке, изготовлении, установке и обслуживании».
5. Надеждин Е.Н. Оценка эффективности механизма защиты сетевых ресурсов на основе игровой модели информационного противоборства. Научный вестник: ООО "Консалтинговая компания Юком" (Тамбов). № 2(4). С. 49-58. ISSN: 2411-1872.
6. Kuchuk, G., Kharchenko, V., Kovalenko, A. and Ruchkov E. (2016), "Approaches to Selection of Combinatorial Algorithm for Optimization in Network Traffic Control of Safety-Critical Systems", *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*, pp. 384-389.
7. Семенов С.Г., Кассем Халифе, Захарченко М.М. Усовершенствованный способ масштабирования гибкой методологии разработки программного обеспечения. Сучасні інформаційні системи. Харків.: НТУ «ХПІ». Т. 1, № 1. С. 19-24.
8. Frank Swiderski, Window Snyder "Threat Modeling", Microsoft Press 2004. ISBN 978-0-7356-1991-3.
9. Jean Francois Monin, Michal G. Hickey (editor) "Understanding Formal Methods", Springer-Verlag 2003, ISBN 1-85233-247-6.
10. Matt Bishop "Computer Security. Art and Science", Addison-Wesley 2003, ISBN 0-201-44099-7.

Надійшла до редколегії 1.11.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Рубан, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Кассем Халифе, Г.Я. Крыховецкий, Г.А. Кучук

В статье предложена методика оценки уязвимости системного программного обеспечения. Теоретическая часть методики базируется на методе динамики средних. Отличительной особенностью разработанной методики является учет возможности масштабирования процесса разработки программного обеспечения путем внедрения специалистов по безопасности (PersonNon, SecDev) без существенного изменения эффективности разработки. На примере стратегии, принятой при имитационном моделировании, проведено исследование и доказана целесообразность использования дополнительных специалистов по безопасности.

Ключевые слова: системное программное обеспечение, безопасность, уязвимость, кибербезопасность.

EVALUATION OF VULNERABILITY OF SYSTEM SOFTWARE

Kassem Khalife, H.Ya. Krikhovetskiy, H.A. Kuchuk

The article suggests a methodology for assessing the vulnerability of system software. The theoretical part of the methodology is based on the method of the dynamics of averages. A distinctive feature of the developed methodology is the possibility of scaling the software development process by implementing security experts (PersonNon, SecDev) without significantly changing the development efficiency. On the example of the strategy adopted in the simulation simulation, a study was conducted and the expediency of using additional security specialists was proved.

Keywords: system software, security, vulnerability, cybersecurity.

УДК 621.317.7

Л.П. Лобанов, В.П. Ярцев, В.А. Сабадаш

Государственный университет телекоммуникаций, Киев, Украина

МНОГОКАНАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ПРИОРИТЕТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗАПРОСОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВОЙ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

Предложенная модель многоканального устройства приоритетного обслуживания индикаторных устройств относится к области оптоэлектроники, в частности к устройствам с дискретно - аналоговой формой представления данных на основе полупроводниковых индикаторов, и может быть использована для управления отображением контролируемой информации от нескольких источников на общем матричном светодиодном поле. Предлагается для моделирования автоматов $U(l, m, n)$, функционирующих в случайной среде, способ декомпозиции сложной модели в более простые.

Ключевые слова: информационная модель, дискретно-аналоговое устройство отображения, приоритетное обслуживание запросов, автоматы с целесообразным поведением, вероятностные характеристики.

Введение

На современном этапе развития техники особое внимание уделяется согласованию свойств системы отображения информации психофизиологическим возможностям обслуживающего персонала. Становится актуальной проблема выбора оптимальной информационной модели представления данных в зависимости от назначения и условий применения при использовании матричных и дискретно – аналоговых схем индикации. Критерием оптимальности выступают надежное восприятие сообщений, информационного соответствия индикатора отображаемым данным. При использовании микроконтроллера в качестве формирователя сигналов управления полупроводниковыми излучателями дискретно-аналоговых индикаторов возможная ситуация, когда одновременно поступают запросы на обработку от разных источников данных.

Целью данной статьи является описание предложенного технического решения построения многоканального устройства приоритетного обслуживания индикаторных устройств с матричной и дискретно – аналоговой формой отображения информации на основе светодиодных излучателей. Использование предложенной схемы позволит увеличить число обрабатываемых источников данных, исключить пропуск требования на обслуживание, повысить быстродействие и надежность формирования информационных моделей.

Результаты исследований

1. Обзор существующих решений по технической реализации устройств приоритетного обслуживания. Для реализации технического решения по управлению устройством формирования управляющих сигналов для коммутации набора па-

нелей светодиодов при формировании информационной модели дискретно – аналоговых полупроводниковых индикаторов используются различные типы автоматов с целесообразным поведением. К их числу можно отнести многоканальное устройство приоритетного выбора, которое позволит сформировать шкалу с большим количеством излучающих элементов (100 и более).

Проведенный патентный поиск показал достаточно большое количество решений по реализации схем приоритетного обслуживания, заявленных в свидетельствах на изобретение. Все они имеют свою цель, область использования, достоинства и недостатки. Так устройство, заявленное в авторском свидетельстве № 1062705 G 06 F9/46, 1983 [1], содержит n блоков регистрации запросов на обслуживание, два мультиплексора, счетчиков числа заявок, дешифратор, сумматор, делитель с переменным коэффициентом деления, RS-триггер. Оно позволяет реализовать адаптивную систему выбора приоритета, повысить достоверность передаваемой информации большого количества внешних устройств в системах реального времени. Основным недостатком является значительные аппаратные затраты, рост которых увеличивается с числом обслуживающих источников данных.

Многоканальное приоритетное устройство, заявленное в № SU №1633403 A1, G06F9/46, 07.03.1991, имеет зависимость приоритетов абонентов от места подключения наиболее важного абонента и отсутствие возможности прерывания обслуживания менее приоритетного абонента при наличии запроса от более приоритетного абонента, т.е. невозможность обслуживания абонентов в соответствии с алгоритмом обслуживания с абсолютными приоритетами.

Известно устройство для приоритетного подключения источников информации к магистрали

/Авторское свидетельство СССР №1117638, G06F 9/46/, содержащее триггеры, элементы НЕ, элементы задержки, И-ИЛИ, одновибраторы. Недостатком устройства является большое количество оборудования и отсутствие возможности реализации циклического алгоритма обслуживания запросов [5].

Многоканальное приоритетное устройство, заявленное в авторском свидетельстве РФ RU 2231111 С2, МПК7 G06F 9/46, 9/50, 10.02.2004г., содержит N каналов, в каждый из которых входит триггер и элемент И, элемент ИЛИ, шифратор и ключи. Недостатком данного устройства является большой объем оборудования [5].

Наиболее близким к предложенной схеме является многоканальное устройство приоритета SU № 855664 А1, G 06 F 9/46, 15.08.1981, содержащее распределитель импульсов, элемент ИЛИ, а в каждом канале - триггер и два элемента И, причем выход первого элемента И канала соединен с установочным входом триггера канала, гасящий вход триггера канала соединен с выходом второго элемента И канала. Выход элемента ИЛИ соединен со входом распределителя импульсов, выход триггера канала соединен с первым входом второго элемента И канала, второй вход второго элемента И канала соединен с соответствующим выходом группы выходов распределителя импульсов, отличающееся тем, что, с целью сокращения оборудования, оно содержит элемент НЕ, вход которого соединен с выходом элемента ИЛИ, а выход - с первыми входами первых элементов И каналов [5].

Второй вход первого элемента И канала соединен с соответствующим запросным входом устройства, выходы триггеров каналов соединены с входами элемента ИЛИ, выход распределителя импульсов является выходом устройства, причем распределитель импульсов содержит счетчик, дешифратор, элемент И, генератор импульсов, причем выходы счетчика через дешифратор соединены с группой выходов распределителя импульсов, выход генератора импульсов и вход распределителя импульсов через элемент И соединены со счетным входом счетчика и с выходом распределителя импульсов.

Недостатком данного устройства является отсутствие возможности принятия запросов для обработки на вход других каналов при поступлении хотя бы одного запроса и во время его обработки, т.е. происходит потеря поступивших на вход других каналов запросов.

2. Структурная схема и принцип работы устройства приоритетного обслуживания индикаторных устройств. Целью предложенного технического решения является увеличение быстродействия устройства, надежности, повышения энергоэффективности за счет сокращения объема оборудования. Поставленная цель достигается тем, что осу-

ществлена возможность принятия запросов для обработки на вход других каналов при поступлении хотя бы одного запроса и во время его обработки, т.е. исключение потери поступивших на вход других каналов запросов [2].

Технический результат достигается тем, что многоканальное устройство приоритета, содержащее распределитель импульсов, элемент ИЛИ, а в каждом канале - триггер и два элемента И, причем выход первого элемента И канала соединен с единичным входом триггера канала, нулевой вход которого соединен с выходом второго элемента И канала, выход элемента ИЛИ соединен со входом распределителя импульсов, выход триггера канала соединен с первым входом второго элемента И канала, второй вход второго элемента И канала соединен с соответствующим выходом группы выходов распределителя импульсов, второй вход первого элемента И канала соединен с соответствующим запросным входом устройства, выходы триггеров каналов соединены с входами элемента ИЛИ, выход распределителя импульсов является выходом устройства, причем распределитель импульсов содержит счетчик, дешифратор, элемент И и генератор импульсов, выходы счетчика через дешифратор соединены с группой выходов распределителя импульсов, выход генератора импульсов и вход распределителя импульсов через элемент И соединены со счетным входом счетчика, дополнительно в каждый канал введен элемент НЕ, вход которого соединен с выходом триггера, а выход с первым входом первого элемента И канала, а выход распределителя импульсов соединен с выходом счетчика.

Введение указанных дополнительных элементов и последовательности их подключения позволяет осуществить возможность принятия запросов для обработки на вход других каналов при поступлении хотя бы одного запроса и во время его обработки, т.е. исключить потери поступивших на вход других каналов запросов.

Многоканальное устройство приоритета (Рис.1) содержит входные каналы (1), коммутатор, выполненный на основе логического элемента ИЛИ (2), число входов которого соответствует количеству входных каналов, и распределитель импульсов (3).

Распределитель содержит дешифратор номера входного канала (4), счетчик таковых импульсов (5), схему совпадения логический элемент двухвходовое И (6) и генератор таковых импульсов (7).

Каждый входной канал содержит две схемы совпадения на логическом элементе двухвходовое И (8, 9), триггер (10) и инвертор -элемент НЕ (11).

Сигнал запроса на обслуживание от информационных источников поступает через группу входов (12). Сигнал управления снимается с выхода устройства (13).

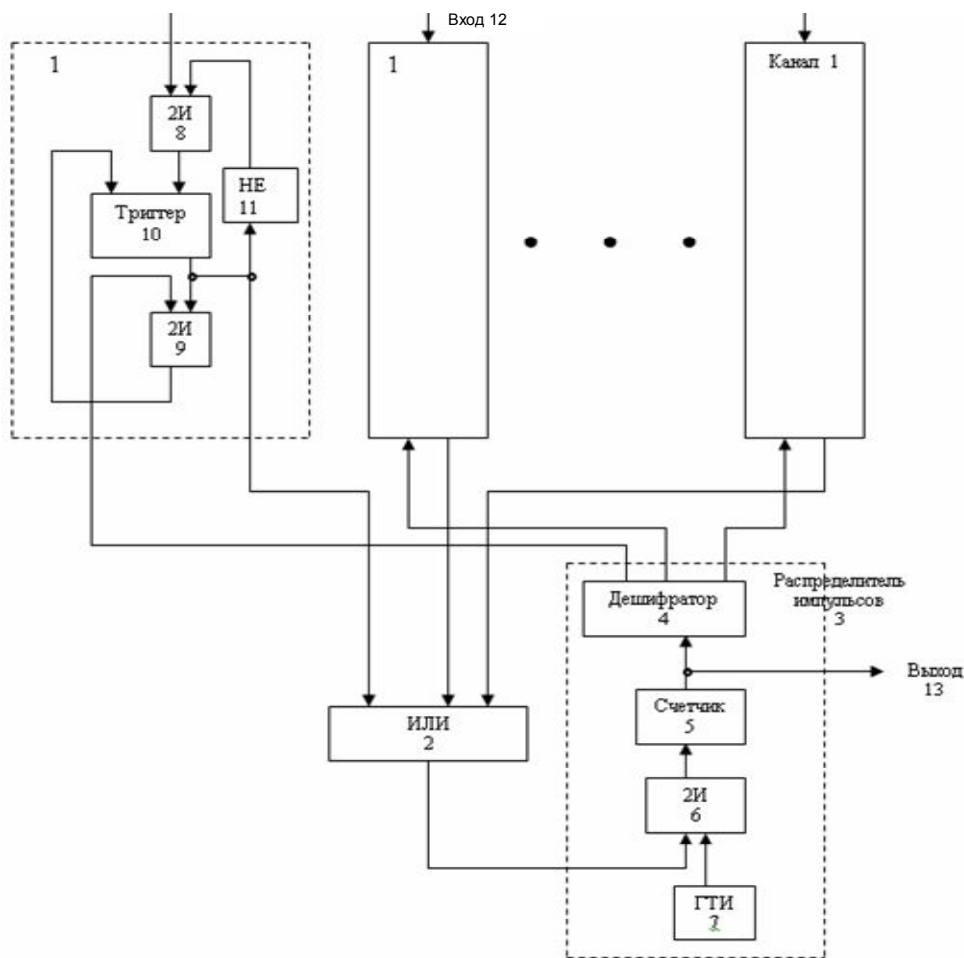


Рис. 1. Структурная схема устройства

Выход первого элемента И (8) любого входного канала (1) соединен с единичным входом триггера (10) этого канала. Нулевой вход триггера (10) соединен с выходом второго элемента 2И (9) канала. Выход элемента ИЛИ (2) соединен со входом распределителя импульсов (3). Выход триггера 10 канала соединен с первым входом второго элемента 2И (9). Второй вход элемента 2И (9) канала соединен с соответствующим выходом группы выходов распределителя импульсов (3). Второй вход первого элемента 2И (8) канала соединен с соответствующим запросным входом устройства источника информации. Выходы триггеров (10) каналов соединены с входами элемента ИЛИ (2). Выход распределителя импульсов (3) является выходом устройства.

Выходы счетчика (5) через дешифратор 4 соединены с группой выходов распределителя импульсов, выход генератора импульсов (7) и вход распределителя импульсов (3) через элемент 2И (6) соединены со счетным входом счетчика (5).

Каждый канал содержит элемент НЕ (11), вход которого соединен с выходом триггера (10), а выход с первым входом первого элемента 2И (8) канала. Выход устройства (13), который является выходом распределителя импульсов (3), соединен с выходом счетчика (5).

В исходном состоянии счетчик (5) распределителя импульсов (3) и триггеры (10) всех входных каналов (1) находятся в нулевом состоянии, а на их выходах присутствуют нулевые потенциалы. Кроме того нулевые потенциалы присутствуют на входах элемента ИЛИ (2), на входах элементов 2И (8) каналов и на входе элемента 2И (6).

Высокие потенциалы присутствуют - на выходе элемента НЕ (11), так как с выхода триггера поступает ноль, следовательно, и на вторых входах элементов 2И (8) каждого входного канала.

При поступлении одного или нескольких сигналов запросов на какой-либо из входов группы входов (12), они через элементы 2И (8) соответствующих каналов передаются на установочные входы триггеров (10) этих каналов и устанавливают их в единичное состояние. При этом высокий потенциал с выхода триггера (10) поступает на один из входов элемента ИЛИ (2) и на вход элемента НЕ (11) данного канала. Тогда на выходе элемента НЕ (11) появится низкий потенциал и элемент 2И (8) данного канала закроется.

Высокий потенциал с выхода элемента ИЛИ (2) поступает на вход элемента 2И (6) распределителя импульсов (3). Этот элемент откроется и импульсы с выхода тактового генератора импульсов (7) через него поступают на счетный вход счетчика (4).

Счетчик (5) работает в пересчетном режиме до тех пор, пока не накопит число импульсов, соответствующее номеру источника запросов. По достижении соответствующего числа импульсов на соответствующем выходе дешифратора (4) появится высокий потенциал и откроет элемент 2И (9) соответствующего канала, на входе которого имеется запрос. Сигнал с выхода элемента 2И (9) этого канала установит триггер (10) в нулевое состояние.

Если на вход устройства поступил запрос только по одному каналу, то выходе элемента ИЛИ (2) появится низкий потенциал, элемент 2И (6) закроется, а с выхода счетчика (5) распределителя импульсов (3) и, соответственно устройства, будет выдан номер канала, обработанного запроса.

Если на вход устройства поступили запросы по нескольким каналам, то с триггеров (10) этих каналов на выход элемента ИЛИ (2) поступят высокие потенциалы. Элемент 2И (6) будет открытым и импульсы с выхода генератора импульсов (7) будут продолжать поступать, на счетный вход счетчика (5). После того как обслужены все запросы, записанные триггеры (10) каналов, на выходе элемента ИЛИ (2) появится низкий потенциал и элемент 2И (6) закроется, а число, выданное с выхода счетчика (5) распределителя импульсов (3) и, соответственно устройства (13), указывает номер канала, обработанного запроса, который имеет наибольший номер из поступивших запросов.

В устройстве прототипе при появлении высокого потенциала с выхода триггера (10) одного из каналов элементы 2И (8) всех каналов закроются и поступившие на вход других каналов запросы не будут обработаны, т.е. будут утеряны.

В предложенном устройстве коммутации запросов при появлении высокого потенциала с выхода триггера (10) одного из каналов элементы 2И (8) всех каналов закроются только в тех каналах, в которых поступили запросы. Поступившие на вход других каналов запросы будут приняты для обработки, т.е. не будут утеряны.

3. Определение вероятностных характеристик автоматов с целесообразным поведением. Для оценки вероятностных характеристик предложенного многоканального устройства приоритетно обслуживания использовался автоматный подход, что позволяет оптимизировать процессы управления сложными техническими системами. В основе многих исследований схем формирования управляющих сигналов для отображения информационной модели, лежит представление системы управления в виде автомата или набора автоматов функционирующих в среде со случайными параметрами.

Оценка целесообразности поведения предусматривает выбор среды с благоприятными для функционирования вероятностными характеристиками. Основной задачей, на которой базируется исследование автоматных моделей, является задача изуче-

ния поведения автомата, функционирующего в случайной среде: $C(P_1, P_2)$ с двумя действиями. При нахождении автомата в области с действием r ($r=1,2$), на вход автомата поступают неблагоприятные сигналы (штрафы) с вероятностью P_r или благоприятные сигналы (нештрафы) с вероятностью $q_r=1-P_r$. Для оценки качества функционирования автомата обычно используется математическое ожидание штрафа $M(A, C)$, где A определяет конструкцию автомата. Автомат A обладает целесообразным поведением, если в процессе функционирования он стремится выбрать действие с меньшей вероятностью штрафа.

Анализ известных конструкций автоматов [3, 4] показывает, что конструкция автоматов зависит от параметра случайной среды и для каждого типа автомата существуют ограничения для вероятностей штрафа, при которых автомат обладает целесообразным поведением. Такой параметр, как математическое ожидание штрафа не позволяет сравнивать качество функционирования различных конструкций автоматов. Очевидной причиной является то, что при исследовании не ограничивают время функционирования. Практически автомат должен функционировать ограниченное время, что существенно влияет на поведение автомата. Следовательно, для более точной картины оценки качества функционирования автомата необходимо ввести как минимум еще один параметр. Таким параметром может служить скорость изменения номеров состояний автомата за один такт функционирования автомата. В области с большей вероятностью штрафа скорость должна иметь значение $V_1 \leq 0$, что обеспечивает постепенный выход из этой области, и наоборот, в области с меньшей вероятностью штрафа скорость должна быть $V_2 \geq 0$, что обеспечивает вход в эту область. Такое поведение называют оптимальным. Например, для автомата Цетлина условия оптимального поведения будут такими:

$$v_1 = q_1 - p_1 > 0, v_2 = q_2 - p_2 < 0,$$

что эквивалентно условию $p_1 < 1/2, p_2 > 1/2$.

С увеличением скорости изменения состояний связано время функционирования автомата. Так как автомат в общем случае функционирует в обеих областях потребуем, чтобы время функционирования $T(k)$ было минимальным, т.е. чтобы минимальным было время достижения некоторого состояния a в области меньшей вероятности штрафа при условии, что начальным состоянием является состояние с тем же номером a в области с большей вероятностью штрафа:

$$T(K) = t_1 + t_2,$$

где $t_1 = \alpha / (kq_1 - p_1)$, $t_2 = \alpha / (kq_2 - p_2)$, $K = l/m$, l, m – взаимно простые целые положительные числа, l – величина прыжка при нештрафе, m – величина прыжка при штрафе.

Находим при каком значении K величину $T(k)$ достигает минимума.

$$\frac{dT(k)}{dk} = q_1 / (kq_1 - p_1)^2 + q_2 / (kq_2 - p_2)^2 = 0$$

После преобразования получаем уравнение $k^2(q_1q_2^2 - q_1^2q_2) + 2K(p_1q_1q_2 - p_2q_1q_2) + (q_1p_2^2 - p_1^2q_2) = 0$.

Корни этого уравнения такие:

$$K_1 = 1 / \sqrt{q_1q_2} - 1; K_2 = -1 / \sqrt{q_1q_2} - 1.$$

Имеет физический смысл только корень K_1 который и определяет структуру (конструкцию) автомата. Полученные конструкции автоматов будем обозначать как $U(l, m)$. Например для среды с вероятностями штрафа $P_1 = 0,6$ и $P_2 = 0,1$ имеем $K = 0,67 = 2/3$. Среди всех предложенных конструкций автоматов с целесообразным поведением можно выделить автоматы типа $W(k, m)$ у которых параметры k, m определяются из выражения

$$k / m = 1 / (q_1q_2) - 1,$$

где $q_1 = 1 - p_1, q_2 = 1 - p_2, p_1, p_2$ – вероятности неблагоприятных воздействий (помех) в средах 1 и 2 соответственно, k, m – целые положительные взаимно простые числа.

Для определения всех вероятностных характеристик автоматов достаточно вычислить вероятности нахождения автоматов в каждом состоянии. Такие вероятности можно определить проще всего для автоматов типа $W(1,1)$, на много сложнее для типа $W(q,1)$ или $W(1,h)$. При величинах $k > 1$ и $m > 1$ нахождение вероятности сопряжено с большими трудностями. Поэтому предлагается, при исследовании автомата $W(k,m)$ провести его декомпозицию, представив в виде более простых структур: $W(1, 1)$ или $W(k,1)$ и $W(1,m)$. Эквивалентность функционирования определяем по одинаковым скоростям изменения номеров состояний в каждой из сред. При выполнении замены изменяют параметры сред, которые определяются по выражениям замены и условиям допустимой замены. Условие допустимой замены автомата $W(k,m)$ определяют из очевидного выражения $0 < p_i^n < 1$, где p_i^n – вероятность неблагоприятных воздействий в i -й среде для автоматов $W(q, 1)$ или $W(1, h)$. Эквивалентность преобразования определяется величиной скорости изменения номеров состояний в каждой из сред.

Выводы

Сопоставительный анализ с прототипом показывает, что предложенное техническое решение устройства приоритетного обслуживания индикаторов с большим числом излучающих элементов, позволяет обеспечить возможность принятия на вход очередного запроса для обработки от других каналов, при условии, что ранее поступил и обрабатывается хотя бы один запрос, что исключает потерю запросов поступивших на вход других каналов. На данное техническое решение получен патент на полезную модель [2]. По результатам проведенного имитационного моделирования определены требования к составу и принципу построения устройств управления индикаторами. Для обеспечения высокой стабильности и эргономичности информационной модели светодиодного индикатора, проведен комплекс измерений и расчетов ее параметров, что позволило осуществить выбор элементов проектируемого устройства с учетом временных и энергетических характеристик.

Для определения вероятностных характеристик устройства предложено использование декомпозицию на отдельные каналы и вычисление вероятности нахождения их в каждом состоянии.

Список литературы

1. Авторское свидетельство № 1062705 G 06 F9/46,1983
2. Патент на полезную модель № 2015144731/08, 20.10.2015.
3. Захаров Н.Г. Синтез цифровых автоматов / Н.Г. Захаров, В. Н. Рогов. – Ульяновск: УлГТУ, 2003.
4. Крушинный В.В. Синтез цифровых управляющих автоматов. Учебное пос. - Москва: МИФИ, 2011.- 164 с.
5. <http://www.findpatent.ru/patent/231/2319198.html>

Надійшла до редколегії 23.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Козелкова, Державний університет телекомунікацій, Київ.

БАГАТОКАНАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ПРІОРИТЕТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВОЇ ФОРМИ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ДАНИХ

Л.П. Лобанов, В.П. Ярцев, В.А. Сабадаш

Запропонована модель багатоканального пристрою пріоритетного обслуговування індикаторних пристроїв відноситься до області оптоелектроніки, зокрема до пристроїв з дискретно - аналоговою формою представлення даних на основі напівпровідникових індикаторів, і може бути використана для управління відображенням контрольованої інформації від декількох джерел на загальному матричному світлодіодному полі. Пропонується для моделювання автоматів $U(l, m)$, що функціонують у випадковій середовищі, спосіб декомпозиції складної моделі в більш прості.

Ключові слова: інформаційна модель, дискретно-аналоговим пристроєм відображення, пріоритетне обслуговування запитів, автомати з доцільним поведінкою, імовірнісні характеристики.

MULTICHANNEL DEVICE FOR PRIORITY SERVICE OF REQUESTS FOR FORMING INFORMATION MODELS OF DISCRETE ANALOGUE FORM OF DATA REPRESENTATION

L.P. Lobanov, V.P. Yartsev, V.A. Sabadash

The proposed model of a multi-channel device for priority maintenance of indicator devices relates to the field of optoelectronics, in particular to devices with a discrete-analog form of data representation based on semiconductor indicators, and can be used to control the display of monitored information from several sources on a common matrix LED field. It is proposed to model the automata $U(l, m)$, functioning in a random environment, the method of decomposition of a complex model into simpler ones.

Keywords: information model, discrete-analog display device, priority query service, automata with expedient behavior, probabilistic characteristics

УДК 004.272.3

В.А. Мартовицкий, И.В. Рубан

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

МОДЕЛЬ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Статья посвящена проблеме создания подсистем, предназначенных для решения задач сбора и хранения параметров в системах мониторинга сетевой инфраструктуры. Рассмотрена модель мультиагентной системы сбора и хранения информации. Целью агентов данной системы является представление пользователю или информационной системе более высокого уровня информации о состоянии наблюдаемой сетевой инфраструктурой, полученной в результате сбора и интеллектуальной обработки параметров.

Ключевые слова: сбор и хранение информации, мультиагентная система, агент, Big Data.

Введение

В системах мониторинга сетевой инфраструктуры происходят радикальные перемены, вызванные обострением конкуренции на рынке, ростом требований к качеству обеспечения безопасности, техническим перевооружением сетей связи, изменением характера распределения трафика. Все это приводит к необходимости осуществления контроля большого количества параметров функционирования сетей различных технологий.

Для этих целей в системе мониторинга сетей применяется подсистема сбора и хранения данных. Она не только меняет представления о системе эксплуатации, переходя от сбора данных параметров отдельных станций к параметрам эксплуатации всей сети, а также автоматизирует многие рутинные процессы по сбору и обработке сетевых данных.

— Анализ этой информации дает возможность выявления разнообразных случаев угроз и нарушений, таких как:

— несанкционированное проникновение в сеть, пропущенное классическими средствами защиты периметра (IPS/IDS);

— распространение вирусов, «червей» и шпионского ПО, не обнаруженных штатными антивирусными средствами.

— неправильные действия пользователей (например, масштабные загрузки с торрент-трекеров, обращение к сегментам сети, к которым нет доступа, попытка доступа к конфиденциальной информации и т.п.);

— появление в сети новых устройств и их поведение;

— ошибки в работе оборудования;

— возникновение в сети «узких» мест и другие возможные нарушения.

Архитектура подсистем предназначенных для решения задач сбора и хранения параметров полу-

ченных от датчиков, характеризуются не только их целевыми функциями, но и функциональными возможностями, обеспечивающими реализацию целевых функций, иерархией и степенью параллелизма решения задач, однородностью либо разнородностью модульной структуры, организацией сбора информации в режиме реального времени, обработки данных и сетевого обмена информацией с абонентами [1].

При этом должны обеспечиваться:

— невмешательство в работу сетевого оборудования;

— постоянный сбор статистической информации, который позволяет создавать крупномасштабные базы данных, необходимые для проведения псевдооперативного и статистического анализа сети;

— обеспечение высокой скорости обработки запросов на предоставление требуемых информационных ресурсов и сервисов;

— выполнение сбора, обработки, хранения полной информации о состоянии всех компонентов телекоммуникационной и информационной инфраструктуры сети в реальном времени независимо от архитектуры сети, типа коммутатора и поставщика;

— создание единого стандартизованного информационного центра хранения данных о состоянии систем и сети.

Учитывая большой объем событий, сопутствующих процессу диагностического мониторинга, многообразие типов событий и устройств в открытой диагностической системе и необходимость функционирования в режиме реального времени с учетом высокой изменчивости внешней среды, задачу построения диагностической сенсорной сети следует отнести к проблематике обработки больших данных (Big Data) [2].

Решение указанной проблемы сопряжено с реализацией новых парадигм программирования,

поддерживающих возможность распределенного взаимодействия автономных активных устройств в процессе решения конкретной оперативной задачи [3].

Для решения выше указанных проблем наиболее подходящей технологией является реализация мультиагентной системы с использованием автономных программных агентов.

Целью данной статьи является описание мультиагентной модели системы сбора и хранения информации, представляющей собой построенную на основе агентов.

Целью данных агентов является представление пользователю или информационной системе более высокого уровня информации о состоянии наблюдаемой сетевой инфраструктурой, полученной в результате сбора и интеллектуальной обработки параметров.

Основная часть

Для выявления разнообразных случаев угроз и нарушений система мониторинга должна осуществлять контроль большого количества параметров состояния компонентов сети, который реализуется на разных уровнях [4].

— Канальный уровень. Данный уровень определяет методы доступа к среде передачи данных и обеспечивает передачу кадра данных между любыми узлами в сетях с типовой топологией по физическому адресу сетевого устройства. Адреса, используемые на канальном уровне в локальных сетях, часто называют MAC-адресами (MAC media access control, управление доступом к среде передачи данных).

— Сетевой уровень. Обеспечивает доставку данных между любыми двумя узлами в сети с произвольной топологией, при этом не гарантируется надежная доставка данных от узла-отправителя к узлу-получателю.

На этом уровне выполняются такие функции: маршрутизация логических адресов сетевых узлов,

создание и ведение таблиц маршрутизации, фрагментация и сборка данных.

— Сеансовый уровень. Реализует средства управления сессией, диалогом, а также предоставляет средства синхронизации в рамках процедуры обмена сообщениями, контроля над ошибками, обработки транзакций, поддержки вызова удаленных процедур RPC.

— Прикладной уровень. Набор сетевых сервисов, предоставляемых конечным пользователям и приложениям. Примеры таких сервисов — обмен сообщениями электронной почты, передача файлов между узлами сети, приложения управления сетевыми узлами.

Контроль параметров на каждом из этих уровней позволяет выявлять угрозы направлению на объекты сетевой инфраструктуры, которые условно можно разделить на такие классы:

Первый класс угроз — это нарушение функционирования сетевой инфраструктуры. Для реализации угрозы возможны следующие типы атак:

переполнение CAM-таблицы,
VLAN Hopping,
атака на STP,
MAC-снупинг,
атака на PVLAN,
атака на DHCP.

Второй класс угроз направленный на маршрутизаторы и их алгоритмы маршрутизации. Для данного класса угроз характерны следующие типы атак:

подмена маршрута RIP,
атака BGP Router Masquerading,
атаки на MD5 для BGP,
«Слепые» DoS-атаки на BGP-маршрутизаторы.

Третий класс угроз направленный на взаимодействие со стеком протоколов TCP/IP. Примерами данного класса угроз являются: сканирование сети, атака Teardrop, атака на TCP, атака на UDP [5].

Исходя из модели мониторинга рассмотренной в статье [6] по техническим и другим причинам логически связанные данные сохраняются в различных форматах под управлением различных систем хранения и обработки данных. Очевидно, что для изучения и анализа информации требуется открытый доступ к локальным и удаленным информационным источникам.

С другой стороны, встает проблема интеграции данных.

Различные коллекции параметров состояния компонентов сети, даже расположенные на одном физическом узле, зачастую имеют различные логические входы и не предоставляют возможности сквозного связывания данных из разных источников.

Необходимость учета всей имеющейся информации по определенному вопросу требует от системы сбора и хранения данных обеспечения прозрачных для пользователей средств доступа к распределенной информации.

Одним из решений данной задачи является реструктуризация разнородных данных. Для реструктуризации данных мониторинга потребуется гармонизация сопоставимой информации к единому представлению, либо расширение структур данных путем добавления уникальных признаков, позволяющих сопоставлять данные из различных источников.

Так или иначе, эта задача весьма трудоемкая, особенно для удаленных друг от друга хранилищ,

так как требует и технического, и организационного взаимодействия от источников. Кроме того, после реструктуризации данных потребуются качественная модификация средств доступа к информации с учетом новых структур данных.

В связи с этим предлагается модель системы сбора и хранения данных, обеспечивающая работу с множеством разнородных источников, путем их интегрирования с целью получения более полного сбора связной информации. Система основана на мультиагентном подходе и позволяет не прекращать обработку запросов при выполнении модификаций набора и структур используемых баз данных.

В зависимости от решаемой задачи реализация мультиагентной системы может кардинально меняться, однако при этом программные агенты сохраняют свойства посреднической деятельности: агенты постоянно взаимодействуют с пользователями или другими программами.

Для взаимодействия между всеми агентами предлагается использовать группу интеллектуальных агентов запроса, целью которых является: координация агентов сбора информации, реструктуризация полученной информации; реализация протоколов и механизмов передачи сообщений между всеми агентами модели.

Функции каждого агента-сбора информации следующие:

- сбор и накопление данных в промежуточном хранилище небольшого объема;
- предварительная обработка данных в реальном времени;
- корректировка интервалов дискретизации;
- обращение к агентам запроса для проведения дополнительных измерений и осуществления комплексного анализа ситуации;

Модель системы сбора и хранения информации представлена на рис. 1.

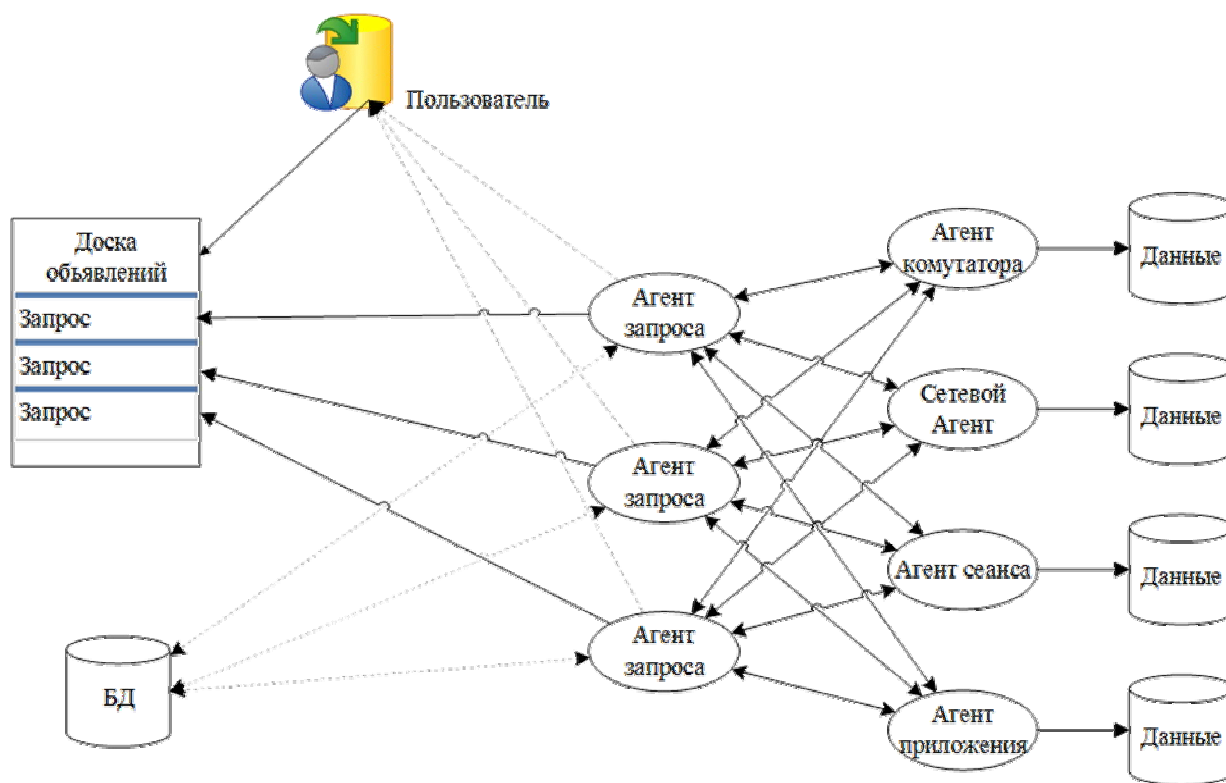


Рис. 1. Модель системы сбора и хранения информации

Модель сбора и хранения информации включает в себя следующие элементы:

— Агент коммутатора и сетевой агент, которые обеспечивают сбор данных с первых двух уровней, описанных выше. Поскольку функционирование канального и сетевого уровня, обеспечивается, в основном, активным сетевым оборудованием и, как правило, реализуются следующими компонентами: сетевыми адаптерами, репитерами, мостами, концентраторами, коммутаторами, маршрутизаторами, для минимизации вмешательства в рабо-

ту сетевого оборудования данные агенты будут работать на основе протокола SNMP. В качестве промежуточного хранилища данных будет использоваться MIB-файлы. Задачей этих агентов является стандартизация данных из файлов для дальнейшей передачи их агентам запросов. Также на агентов возложена задача по управлению доставкой аварийных сообщений, поскольку протокол SNMP работает через ненадежный протокол UDP [7].

— Агент сеанса, который обеспечивает сбор информации про имя пользователя, имя терминаль-

ной линии, астрономическое время начала сеанса, продолжительность бездействия терминальной линии с момента последнего обмена, идентификатор процесса интерпретатора команд shell для каждого из пользователей, работающих в системе. В зависимости от операционной системы промежуточные хранилища могут отличаться.

Так, например, для UNIX систем такими хранилищами будут системные файлы /etc/utmp, /etc/wtmp, /etc/inittab.

— Агент приложения отвечает за сбор данных от разных приложений специфических для той или иной информационно-вычислительной системы.

— Агенты запроса цель которых является обработка запросов на выборку данных от пользователей системы сбора, координация других агентов для сбора необходимой информации, а также реструктуризация полученной информации для хранения статистических данных о системе в целом.

Заклучение

В статье представлена модель мультиагентной системы сбора и хранения информации. Предлагаемое решение имеет следующие преимущества:

— ориентирована на одновременную работу с множеством запросов и разнородных информационных источников;

— создание единого стандартизованного информационного центра хранения данных о состоянии систем и сети;

— уменьшение нагрузки на сеть за счет использования промежуточных хранилищ и регулирования обмена информацией между агентами.

На основе предложенного подхода ведется разработка и реализация мониторинга кластерных суперкомпьютеров.

Дальнейшее развитие системы направлено на разработку оптимальной структуры реляционной базы данных для создания единого стандартизован-

ного информационного центра хранения данных о состоянии систем и сети.

Другим направлением развития является использование методов машинного обучения для корректной обработки неполных или отсутствующих данных в детектировании аномальных состояний информационно-вычислительной системы.

Список литературы

1. Петров, Назар Сергеевич. "Архитектура кластерной системы сбора и обработки информации датчиков динамических объектов." *Известия Южного федерального университета. Технические науки* 11 (148) (2013).

2. Sahandi, Reza, et al. "Wireless technology in the evolution of patient monitoring on general hospital wards." *Journal of medical engineering & technology* 34.1 (2010): 51-63.

3. Иващенко, А. В., А. А. Минаев, and М. Ю. Сподобаев. "Шаблон агента-медиатора для программного обеспечения сенсорных сетей." *Программные продукты и системы* 3 (111) (2015).

4. Капустин, С. П., and В. Е. Дементьев. "Информационно-вычислительные сети: учебное пособие." Ульяновск: УлГТУ, 2011.—141 с (2011).

5. Мартовичский В.О. Критерии обнаружения угроз безопасности по цели сетевого воздействия // *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології: Збірник тез доповідей II міжнародної науково-практичної конференції, 20-22 квітня 2017 року, м. Кропивницький.*, 2017- с. 60.

6. Ruban, I., V. Martovytskyi, and N. Lukova-Chuiko. "Разработка модели мониторинга кластерных суперкомпьютеров." *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* 6.2 (2016): 32-37.

7. Кенин, Александр Михайлович. *Самоучитель системного администратора. 3-е изд. БХВ-Петербург, 2012.*

Надійшла до редколегії 15.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МОДЕЛЬ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

В.О. Мартовичський, І.В. Рубан

Стаття присвячена проблемі створення підсистем, призначених для вирішення завдань збору та зберігання параметрів в системах моніторингу мережевої інфраструктури. Розглянуто модель мультиагентної системи збору і зберігання інформації. Метою представників цієї системи є уявлення користувачеві або інформаційній системі більш високого рівня інформації про стан спостерігається мережевою інфраструктурою, отриманої в результаті збору та інтелектуальної обробки параметрів.

Ключові слова: collection and storage of information. multiagent system, agent, Big Data.

MODEL OF MULTIAGENT SYSTEM OF INFORMATION COLLECTION AND STORAGE

V.A. Martovytskyi, I.V. Ruban

The article is devoted to the problem of creating subsystems intended for solving tasks of collection and storage of parameters in network infrastructure monitoring systems. The model of a multi-agent system of information collection and storage is considered. The goal of the agents of this system is to provide the user or information system with a higher level of information about the status of the monitored network infrastructure obtained as a result of the collection and intelligent processing of parameters.

Keywords: collection and storage of information. multiagent system, agent, Big Data.

УДК 621.396

В.В. Поповский¹, Г.В. Сокол²¹ Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харків² Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

ПРОАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Предлагается для решения задач N использовать децентрализованные, проактивные методы управления ресурсами в сложившейся мультиагентной группировке RES. С использованием разработанной модели когнитивного поведения в мультиагентной среде решена задача о равномерном (консенсуальном), линейном размещении точек на отрезке (на множестве ресурса). Дается анализ состояния модели при поиске консенсуального решения. Даны рекомендации по дальнейшему расширению решений на другие задачи телекоммуникаций.

Ключевые слова: мультиагентные сети, пиринговые сети, электромагнитная совместимость, телекоммуникационные сети, агенты.

Введение

На сегодняшний день имеется множество методов решения проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Несмотря на постоянный поиск и усовершенствования этих методов и все более расширяющийся объем используемых для этого физических ресурсов, данная проблема не будет до конца решенной, пока существует цивилизация. Иначе: все возрастающие потребности в использовании радиоэлектронных средств требует все более совершенных методов обеспечения ЭМС.

Исторически новыми, получившими наибольшее развитие для решения задачи, явились методы обеспечения ЭМС основанные на предварительном планировании радиочастотной обстановки путем назначения и распределения частот, взаимного удаления и пространственно-поляризационный разнос приемо-передатчиков с целью повторного использования частотного ресурса и др. [1]. В процессе эксплуатации, когда возникает конфликтная ситуация, связанная с нарушением внутрисистемной или межсистемной ЭМС, находят приемлемые методы дистанционирования, методы, основанные на изменении соотношений ресурсных параметров: перестраиваются на новые частоты, находят временной консенсус или меняют пространственное положение и поляризацию, применяют ряд других методов, направляемых на повышение развязки [1]. Все эти методы решения проблемы ЭМС носят реактивный характер, то есть исполняются как реакции на поступившее внешнее воздействие.

Вместе с тем, в наступившую эпоху развития управляемых, адаптивных и самоорганизующихся систем все большую популярность приобретают активные (проактивные) методы решения различных задач, в том числе задач ЭМС. К числу таких относятся задачи так называемого «когнитивного радио», когда за счет контроля эфира, находятся участки ра-

диочастотного спектра (РЧС) временно освободившиеся от передачи информации. Временная работа на этих участках и представляет суть данного радио.

Такая активная стратегия при решении задач ЭМС может быть расширена и на другие ресурсы информационной системы, то есть на групповое использование ее ресурсов в динамике функционирования. Известно, что такие попытки предпринимались и реализовывались в виде централизованного управления в радиосети [1]. Однако эти решения не получили распространения, поскольку для контроля и управления нужно было создавать еще одну параллельную радиосеть, при этом терялся весь смысл такой борьбы за ЭМС.

Совсем иной эффект получается при использовании децентрализации методов решения задач ЭМС, когда каждая радиостанция (формация) решает задачу лишь со своим ближайшим окружением (другими формациями) в реальном масштабе времени. Децентрализованное распределенное управление формациями можно охарактеризовать как формирование геометрических образов в пространстве группой агентов при помощи локального обмена информацией [2, 3]. Широко известны и популярны файлообменные децентрализованные пиринговые P2P-сети, работающие через Интернет как оверлейные [4].

Локальность взаимодействия означает, что агент не имеет, либо не использует информацию о системе в целом и контактирует лишь с относительно узким кругом «соседей». Такой базовой децентрализованной является модель кооперативного поведения с достижением консенсуса между выходами агентов.

Многие системные практические задачи сводятся к нахождению условий консенсуса в сети агентов при которых разница между текущим значением состояния $x_i(t)$ и неким требуемым x^* достигает желаемого уровня.

Определение [2]: В сети достигается среднеквадратический консенсус (ϵ -консенсус) в момент

t_i , если $M\|x_i(t)\|^2 < \infty$, $i \in n$ и существует случайная величина x^* , что $M\|x_i(t) - x^*\|^2 \leq \varepsilon$, $\forall i \in n$.

Моделям коллективного поведения мультиагентных систем (МАС) и анализу их функционирования посвящено много работ [2,3]. Мы воспользуемся теоретическими результатами работ по МАС для нахождения консенсусного коллективного решения по обеспечению ЭМС в группировке радиоэлектронных средств.

Результаты исследований О нахождении консенсусных решений в мультиагентных сетях

Среди задач, решение которых можно свести к нахождению условий консенсуса в многоантенных системах можно указать на задачи синхронизации, достижения баланса состояний, управления мощностью абонентских терминалов в числе и решение задач электромагнитной совместимости и др. Задача о достижении консенсуса состоит в формировании протокола управления, обеспечивающего консенсусное решение. В условиях линейности это управление непосредственно зависит от оценки разницы j -х агентов и состояний i -го агента:

$$u_i(t) = D_{ij}(t) \hat{x}_i(t), \quad (1)$$

где $D_{ij}(t)$ - коэффициент, который определяет оптимальность переходного режима управления [5].

Условия ЭМС характеризуются уровнем взаимодействия состояний отдельных радиостанций, узлов, агентов и для конкретного i -го агента эти условия могут быть описаны в виде матрицы взаимодействий $A = (a_{ij})$, элементы a_{ij} которой определяют уровень воздействия агента j на агента i . В предположении того, что в группировке i -х агентов происходит процесс поиска более благоприятных соотношений состояний i -го агента во взаимодействии с j -агентами, данный процесс можно представить дифференциальным уравнением

$$dx_i(t)/dt = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Уравнение состояния (1) может быть представлено также в дискретном виде:

$$x_i(k+1) = x_i(k) - \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i(k) - x_j(k)), \quad (3)$$

где k - номер шага дискретизации.

В матричной форме уравнение состояния системы агентов имеет вид:

$$dx_i(t)/dt = -Lx(t),$$

где $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ - вектор состоя-

ний, L - лапласовская матрица модели агентов, определяемая равенством:

$$L = \text{diag}(A1) - A, \quad 1 = (1, 1, \dots, 1)^T.$$

Систему взаимодействующих агентов можно представить в виде сети, где матрица $A = (a_{ij})$ задает взвешенный граф зависимостей G с множеством вершин $V(G)$ и дуг $E(G)$ с весом $w_{ij} = a_{ij}$. В модели системы (2) направленность дуг ориентирована от зависимых агентов в направлении агента i .

Модель коллективного поведения

Под коллективным поведением агентов будем подразумевать взаимодействия приемо-передающих узлов телекоммуникационных сетей, а также соответствующие сетевые ресурсы, участвующие в формировании радиочастотной обстановки: несущие частоты мешающих передатчиков, параметры модулированных сигналов, их уровни, пространственно-поляризационные параметры и др., то есть те параметры, по которым приходится взаимодействовать отдельной i -й радиостанции с j -м коллективом станций, использующими общий ресурс. Предполагаем при этом, что x_i, x_j состояния всех взаимодействующих агентов в процессе функционирования изменяют номиналы своих параметров с конечной скоростью:

$$dx(t)/dt = V_x.$$

Задачи консенсуса (задачи сходимости состояний агентов к общему решению) полностью адекватна задачам по обеспечению ЭМС. В частности к такому типу относятся задачи равномерного расположения агентов на отрезке $f_k - f_n$, на плоскости $(x, y) \in S$ или в N -мерном пространстве. Так, на практике это решение приводит к рациональному занятию всеми передатчиками выделенного участка радиочастотного диапазона. В других случаях задача сводится к выбору числа позиций в многопозиционном сигнале i -й радиостанции, достаточном для заданного качества приема или к выбору уровней параметров передаваемых и принимаемых сигналов и др.

Очевидно, кроме равномерного распределения агентов на ограниченной шкале возможны и другие варианты: приоритетное расположение, с ограничением на интервале конечность интервалов и др. [2,3].

Задача о равномерном линейном размещении точек на отрезке

Децентрализация предполагает, что для принятия решения i -м агентом на отрезке (на оси частот) достаточно информации о расстояниях между двумя ближайшими соседями. В процессе решения задачи каждый из n -агентов движется в направлении середины отрезка, соединяющего его с ближайшими соседями, а крайние: первый и последний агенты, стремятся занять положение между границами отрезка и ближайшими к ним по номерам соседями.

Решение задачи:

Дано: $x(t)$ - координаты положения агента в i -й точке шкалы в момент $t \geq 0$, x_b, x_e - фиксированные координаты начала и конца отрезка шкалы соответственно, $dx_i(t)/dt = V_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ - скорость измерения координаты i -й точки агента.

Выбор закона управления [3]:

$$V_1 = (x_2 + x_6)/2 - x_1, \quad V_3 = (x_e - x_{n-1})/2 - x_n,$$

$$V_2 = (x_{i+1} + x_{i-1})/2 - x_i, \quad i = 2, 3, \dots, n - i.$$

Для линейной динамической системы уравнение динамики перемещения агента вдоль отрезка $x = x_b - x_e$ при поиске консенсусного решения представляется в виде

$$dx_i(t) / dt = Ax(t) + b,$$

где $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ - вектор состояния формаций агентов, $b = [0.5x_b, 0, \dots, 0.5x_e]$,

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0.5 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0.5 & -1 & & 0.5 & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0.5 & -1 \end{bmatrix}, \quad A \in \mathbb{R}^{n \times n}.$$

Матрица A отрицательно определена при любых n , следовательно существует обратная A^{-1} система (4) положительно определенная. При этом система - устойчива.

Анализ состояния модели системы при поиске консенсусного решения

Собственные значения λ_k матрицы A равны:

$$\lambda_k = -2 \sin^2 \frac{k\pi}{2(n+2)}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Приведем систему (2) к одноранговому виду путем замены переменных $z = x - x^*$, где $x^* = -A^{-1}b$. В результате получаем:

$$dz(t) / dt = Az(t). \quad (5)$$

Очевидно $z(t)$ стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$, а x_i стремится к выражению $x_b + i(x_e - x_b) / (n - 1)$ при $t \rightarrow \infty$, $t = 1, 2, \dots, n$. Для (5) существует оценка

$$\|z(t)\| \leq e^{\lambda t} \|z(0)\|. \quad (6)$$

Отсюда с учетом замены переменных

$$\|x(t) - x^*\| \leq e^{\lambda t} \|x(0) - x^*\|$$

получаем оценки скорости сходимости алгоритма

$$\hat{\lambda} = \max_k \operatorname{Re} \lambda_k = 2 \sin^2 (\pi / (2(n - 1))). \quad (7)$$

При большом значении n справедлива приближенная оценка [3]:

$$\lambda = \pi^2 / 2n^2. \quad (8)$$

Итак, алгоритм сходится со скоростью обратно пропорциональный квадрату числа позиций на оси

отрезка. Продемонстрируем динамику сходимости алгоритма к установившемуся состоянию.

Пример. Пусть начальные положения 4-х точек расположен в координатах $x_{0i} = 4; 4.8; 5.2; 5.9$. Разместить их на отрезке $x = x_b - x_e = 4 - 1$. Траектории движения точек в процессе поиска консенсуса найдем из решения уравнений (4). Графические решения задачи представлены на рис. 1.

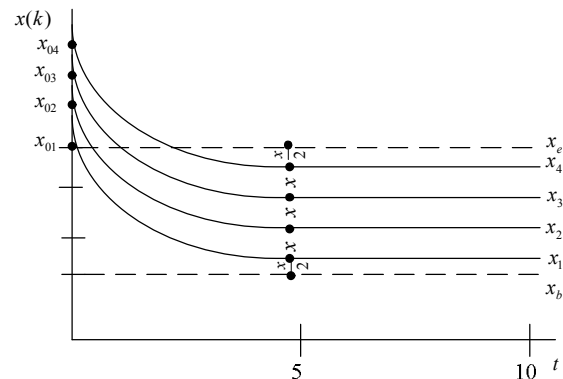


Рис. 1. Траектория движения 4-х точек x_i , $i = 1, 2, 3, 4$ внутри отрезка $x_e = 4$, $x_b = 1$

Согласно оценке $\|x(t) - x^*\| \leq e^{\lambda t} \|x(0) - x^*\|$ на интервале $t = 10$ ошибка оценки составила $\|x(10) - x^*\| = 0.016$. При отсутствии различных дестабилизирующих факторов $\delta \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Дальнейшие расширенные задачи поиска консенсуса

Выстраивание траекторий движения точек равноотстоящих друг относительно друга является частным решением установления консенсуса. Возможно, очевидно, и более расширенная постановка задачи, основанная на использовании поиска минимальности разницы состояний i и j агентов: $\tilde{x} = x_i - x_j$ с использованием управления вектором весовых коэффициентов системы (4). Очевидно, получить консенсусное решение за счет вектора $w_{ij} = a_{ij}$ применительно к уравнениям (2), (3) не удастся, ибо минимизировать разницу можно лишь за счет одного из слагаемых.

В соответствии с определением [2] для удовлетворения критерия $\min M \|x_i - x_j^*\|^2 < \epsilon$ найдем алгоритм, обеспечивающий нахождение x_j^* . Очевидно $x_j^* = x_j w_j$, где w_j - ВВК (вектор весовых коэффициентов) $\forall j \in n$. В результате получаем критерий:

$$\min M \|x_i - x_j^*\|^2 = \min M \|x_i - w_j\|^2 \quad (9)$$

и с учетом этого критерия задача консенсуса сводится к оценке значений ВВК, управляющих состоянием j -х агентов.

Для оценки ВВК w_j воспользуемся формальной схожестью уравнений (2), (3) с уравнениями стохастической аппроксимации [5]. При этом искома оценка ВВК приобретает вид

$$\hat{w}(k+1) = \hat{w}(k) + \mu[x_i(k) - x_j(k)\hat{w}_j(k)]x_i(k), \quad (10)$$

где μ – шаговая постоянная, определяющая скорость сходимости к установившемуся состоянию.

Общий вид алгоритма (8) представлен на рис. 2.

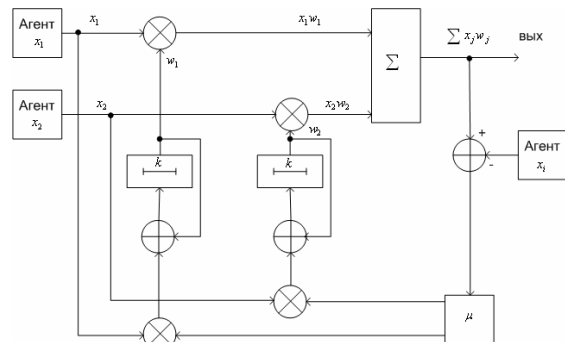


Рис.2. Структура алгоритма оценки ВВК при нахождении консенсуса для агента x_i

Заключение

1. Многие задачи телекоммуникаций могут быть решены с использованием модели мультиагентных систем. Такие модели хорошо согласовываются с решением задач о децентрализованном управлении, когда между разнородными частями системы (агентами) в результате взаимодействий, носящих локальный характер удается находить удовлетворяющее всех консенсусное решение. При этом агенты констатируют свое поведение лишь с ограниченным числом ближайших соседей.

2. К задаче нахождения консенсусного решения могут быть сведены многие задачи телекоммуникаций: синхронизации, баланса состояний, распределения ресурсов, нахождения равновесных состояний, в том числе и решения задач электромагнитной совместимости в беспроводных системах.

3. Наряду с традиционным методом решения задач, представляемых как задачи реагирования на появившиеся нарушения условий ЭМС, все более популярными становятся проактивные методы, основанные на поиске рациональных решений в текущей радиоэлектронной обстановке. Использование такого когнитивного динамического подхода позволяет значительно расширить объем ресурсов, пригодных для удачных решений.

4. Приведен пример решения задачи построения алгоритма равноудаленного расположения агентов на некотором физическом отрезке, где каждый агент стремится расположиться в средние между двумя ближайшими соседями. Приведены результаты математического моделирования и расчета траекторий переходного режима.

5. Представлено направление дальнейшего расширения адаптивного управления вектором весовых коэффициентов многоантенной системы, построенного на основе метода стохастической аппроксимации.

Список литературы

1. Управление радиочастотным спектром и ЭМС // Под ред. М.А.Быховского. М: Эхо-Трендз, 2006 – 233 с.
2. Чеботарев П.Ю., Агаев Р.П. Согласование характеристик в многоагентных системах и спектры лапласовских матриц орграфов. // А и Т, 2009, №3, с.136-151.
3. Квинто Я.И., Парсегов С.Э. Равноудаленное расположение агентов на отрезке: анализ алгоритма и его обобщение // АиТ, 2012, №11, с.30-41.
4. Москалец Н.В., Поповская Е.О. Модели одноранговых пиринговых сетей для передачи IPTV. Международный научно-исследовательский журнал. ISSN 2303-9868, №4(23), 2014. 4.2. стр. 46-50.
5. Popvskij V., Barkalov A., Titarenko L. Control and Adaptation in Telecommunication Systems. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg, 2011, 314 с.

Надійшла до редколегії 8.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л. Н. Беркман, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ПРОАКТИВНІ МЕТОДИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

В.В. Поповский, Г.В. Сокол

Пропонується для вирішення задач N використовувати децентралізовані, проактивні методи управління ресурсами в мультиагентному угрупованні RES. З використанням розробленої моделі когнітивної поведінки в мультиагентному середовищі, вирішена задача про рівномірне (консенсуальне), лінійне розміщення точок на відріжку (на множині ресурсу). Дається аналіз стану моделі при пошуку консенсуального рішення. Дані рекомендації щодо подальшого розширення рішень на інші задачі телекомунікацій.

Ключові слова: мультиагентні мережі, пірінгові мережі, електромагнітна сумісність, агенти.

PROACTIVE METHODS FOR SOLVING PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN WIRELESS TELECOMMUNICATION SYSTEMS

V.V. Popovskij, G.V. Sokol

The article discusses to solve tasks N with using decentralized, proactive methods of resource management in the existing multi-agent group RES. The problem of the uniform (consensual), linear placement of points on a segment (on the resource set) is solved in the multiagent environment using the developed model of solving cognitive behavior. The analysis of the state of the model in the search for a consensual solution is given. The recommendations for further expansion of solutions to other tasks of telecommunications are given.

Keywords: multiagent networks, peer networks, electromagnetic compatibility, agents.

УДК 004.043

М.А. Скулиш, Є.О. Вольвач, Л.С. Глоба

Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського", Київ

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ОБСЛУГОВУВАННЯ У СКЛАДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У статті запропоновано комплекс методів для керування якістю обслуговування мультисервісного потоку у гетерогенному телекомунікаційному середовищі. Проаналізовано основні проблеми контролю якості комплексної мережі, пов'язані з залученням додаткових ресурсів для обслуговування абонентів. Запропоновано системний підхід до керування системою обслуговування мобільних абонентів, яка складається з власної інфраструктури оператора зв'язку та орендованих підсистем обслуговування.

Ключові слова: мережа GSM, якість обслуговування в ТКС, оптимізація ресурсів мережі, динамічне керування ресурсами, керування параметрами QoS.

Вступ

В умовах розвитку хмарних технологій, коли на телекомунікаційному ринку з'являється все більше провайдерів телекомунікаційних підсистем обслуговування абонентів. Але на сьогоднішній день існує можливість залучення додаткових орендованих ресурсів сервера для обслуговування більшої кількості абонентів та покращення показників QoS. Оператори зв'язку можуть розраховувати на потужності орендованих ресурсів, тому постає проблема керування не лише власною інфраструктурою, але й орендованими ресурсами, постає задача керування якістю комплексної гетерогенної системи обслуговування.

Задача такої системи полягає в тому, щоб на основі показників якості обслуговування визначити кількість додаткових ресурсів, яку необхідно залучити в поточний момент часу. Тобто, блок керування системи GSM повинен вирішити два завдання: який вузол потрібно розширити і на який об'єм ресурсів. На основі цих даних укладається договір на обслуговування, у якому визначається об'єм ресурсів, які необхідно взяти у орендодавця. Додатковий об'єм ресурсів не повинен бути занадто великим (оскільки це неефективно та надто затратно) і замалим (щоб гарантувати задану якість обслуговування абонентів). Тому блок керування повинен визначити оптимальну кількість додаткових ресурсів, яка забезпечить необхідне співвідношення між витратами та якістю обслуговування відповідно до договору.

Особливо гостро дана проблема постає для безшовних технологій, які повинні забезпечувати задану якість обслуговування в місцях великого скупчення абонентів. Виникає задача територіального перерозподілу ресурсів обслуговування для забезпечення швидко змінюваних потреб абонентів. На сьогоднішній день оператор зв'язку керується лише статистичними даними про інтенсивність надходження запитів від абонентів та їх територіальний розподіл. Інформацію про активність абонентів можна використати в якості вхідних даних для динамічної зміни кількості

замовлених ресурсів для забезпечення якості обслуговування. Таким чином, виникає ще одна задача прогнозування кількості додаткових ресурсів на основі даних про поведінку абонентів протягом проміжку часу та заданої якості обслуговування. Вирішення задачі прогнозування дозволить визначити, чи потрібно додавати або згортати ресурси обслуговування, щоб уникнути надлишковості ресурсів і, разом з тим, забезпечити необхідні параметри QoS.

Управління процесом обслуговування в телекомунікаційній мережі

Гетерогенна телекомунікаційна мережа (рис. 1) складається з каналів зв'язку (фізичних та віртуальних), вузлів передачі даних (керованих апаратно та/або програмно) та обчислювального середовища, розташованого у дата центрах (як власних так і орендованих) з віртуалізованою організацією процесів обробки інформації. Частина телекомунікаційного середовища, де здійснюється надання заданої групи телекомунікаційних сервісів, називається вузлом обслуговування.

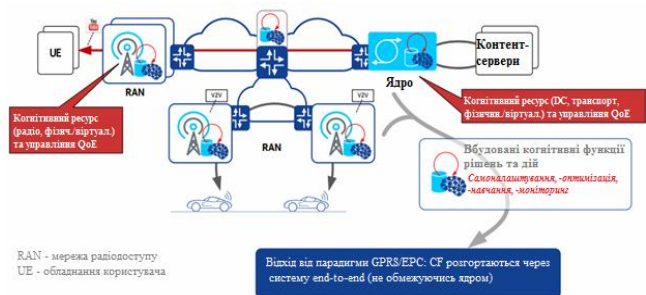


Рис. 1. Гетерогенне телекомунікаційне середовище обслуговування телекомунікаційних сервісів

Вузлами обслуговування виступають підсистеми інформаційно-телекомунікаційної системи, які мають різні технічні характеристики, а також виконують різноманітні функції такі як:

- функції взаємодії з абонентськими терміналами (базові станції),

- функції прийому та передачі потоків у транспортній системі (комутаційне обладнання),
- функції обслуговування службових інформаційних потоків (підсистеми ядра мобільного зв'язку).

Кількість споживаних ресурсів залежить від навантаження на систему, тобто від кількості операцій які виконує пристрій. Тому організація потоків навантаження на підсистеми телекомунікаційної мережі дозволить оптимізувати енергетичні витрати. Основна задача полягає в тому, щоб постає задача: розрахувати параметри для вузлів телекомунікаційної мережі таким чином, щоб загальне споживання електричної енергії було мінімальним, а якість надання послуг не змінилася.

Система управління якістю у гетерогенному телекомунікаційному середовищі вирішує проблеми організації процесу обслуговування, які виникають при функціонуванні телекомунікаційних систем та обчислювальних систем, які забезпечують телекомунікаційну систему. До основних показників якості, які можуть контролюватись відповідною системою, відносяться:

- допустимий час затримки заявок у процесі обслуговування;
- допустимий відсоток втрачених пакетів;
- коефіцієнт використання ресурсів.

Для кожного з цих показників встановлюється певний інтервал, за межі якого вони не повинні виходити. На основі відповідності поточного значення параметру QoS допустимому, обчислювальна система робить висновок про необхідність перерозподілу ресурсів або залучення додаткового об'єму.

Специфіка навантаження, що створюється телекомунікаційними сервісами, потребує спеціальних підходів до планування ресурсів. Забезпечення функціонування гетерогенного телекомунікаційного середовища на заданому рівні якості відбувається за рахунок впровадження системи управління процесом обслуговування телекомунікаційних сервісів (рис. 2).

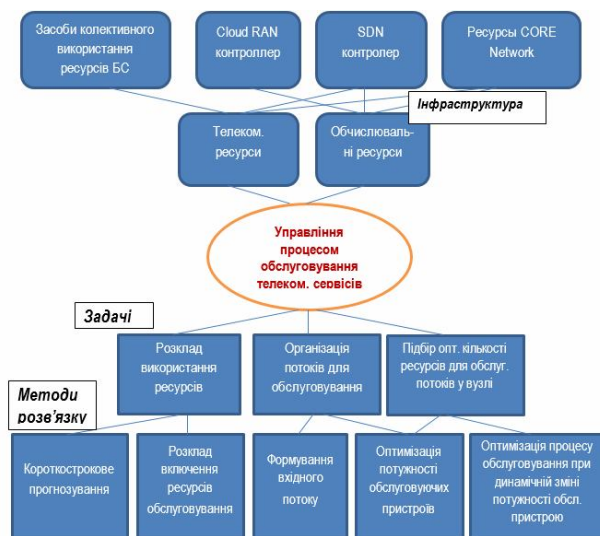


Рис. 2. Гетерогенне телекомунікаційне середовище та способи забезпечення показників якості

Розроблена система керування процесом обслуговування телекомунікаційних сервісів, є складною системою, в якій можна виділити три основні підсистеми: система формування, система моніторингу, система реагування та керівного впливу (рис. 3).

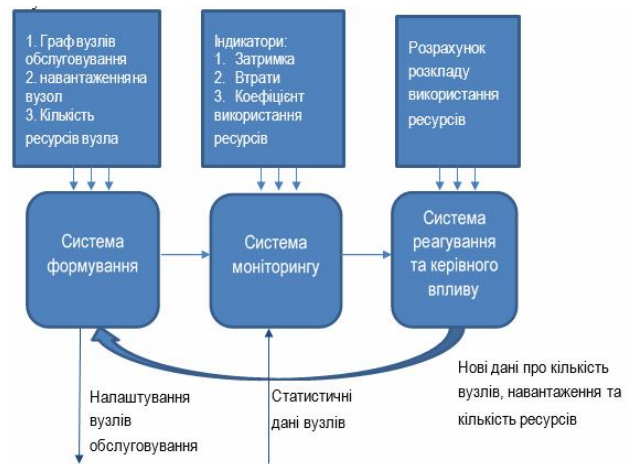


Рис. 3. Управління процесом обслуговування телекомунікаційних сервісів.

Система формування відповідно до графу вузлів визначає кількість потоків, які направляються на обслуговування вузол та кількість ресурсів обслуговування спираючись на дані статистик тестових систем та навантаження, яке плануються.

Система моніторингу поточних параметрів збирає та аналізує кількісні параметри функціонування системи. Перевіряє відповідність параметрів за вибраний період часу для відстеження тенденцій та порівняння параметрів QoS з пороговим значенням. на основі отриманих від систем формування даних та порогових значень.

Система реагування та керівного впливу приймає рішення про час зміни конфігурації, планування регулярних змін конфігурацій, передає системі формування нові значення кількості потоків навантаження та вимог до ресурсів обслуговування відповідно до вузла.

Основна задача системи керування: підтримувати показники якості обслуговуванні на заданому рівні якості, щоб поточні оцінки параметрів функціонування системи не перевищували граничних значень параметрів.

Задача керування якістю обслуговування у гетерогенній телекомунікаційній мережі

В мультисервісних мережах обслуговування однією з проблем є готовність обслуговування непередбачуваних сплесків навантаження, які з'являються в мережі у важко передбачувані моменти часу. Тому в процесі обслуговування необхідно контролювати показники якості обслуговування, затримка обслуговування окремих пакетів потоку, втрати пакетів, які надто довго простояли в черзі [1]. запропоновані ме-

тоди, направлені на формування мережі вузлів обслуговування телекомунікаційних сервісів, керування потоками телекомунікаційних сервісів з метою їх обслуговування на заданому рівні якості, та контролем коефіцієнту використання ресурсів вузлами обслуговування. Для керування якістю обслуговування абонентів у гетерогенній телекомунікаційній мережі пропонується використовувати такі методи:

1. *Метод короткострокового прогнозування навантаження* [2].

Даний метод дозволяє на основі даних статистики визначити імовірне навантаження у визначений період часу. Таким чином блок керування може приймати рішення щодо необхідності зміни конфігурації системи у випадку збільшення навантаження і навпаки.

2. *Метод побудови розкладу залучення ресурсів на основі довгострокової статистики із забезпеченням показників якості та енергоефективності* [3].

Дозволяє визначити моменти переключення системи на необхідну конфігурацію, використовуючи показники втрат заявок, значення очікуваної затримки та енергоефективність процесу обробки заявок у телекомунікаційних вузлах.

3. *Метод формування вхідного потоку навантаження для ефективного використання ресурсів обслуговування* [4].

Дозволяє визначити рекомендоване значення інтенсивності вхідного потоку, який буде направлено в обслуговуючий пристрій, виходячи з ергодичного розподілу для можливих станів системи. Таким чином можна розрахувати верхню межу для планування інтенсивності вхідного навантаження, із урахуванням бажаної допустимої затримки заявок у системі обслуговування та максимальному використанні технічних ресурсів обслуговування.

4. *Метод керування енергозбереженням при обслуговуванні абонентського навантаження групою обслуговуючих пристроїв.*

Дає можливість визначити, на скільки може бути зменшена потужність базової станції, щоб показники якості обслуговування залишилися на заданому рівні, а кількість спожитих енергоресурсів була мінімальною.

5. *Метод вибору потужності обслуговуючого пристрою, для забезпечення процесу обслуговування на заданому рівні якості для багатоканального обслуговування* [5].

На відміну від звичайного підходу щодо балансування навантаження, коли для забезпечення зростаючого навантаження додається додаткові обслуговуючі пристрої між якими виконується розподілення запитів за деяким законом, запропонований метод дозволяє при обслуговуванні телекомунікаційних сервісів, які характеризуються високою інтенсивністю вхідного потоку використовувати набір віртуальних сутностей, робота яких утворює єдиний простір обслуговування, та розрахувати параметри системи як єдиного обслуговуючого пристрою із змінною

інтенсивністю обслуговування. Комплексна система керування якістю обслуговування включає в себе використання всіх вищеперелічених методів. Ефективність використання такого підходу була доведена на етапі моделювання мережі в системі GPSS.

Управління процесом обслуговування телекомунікаційних сервісів є складним процесом, який оперує великою кількістю вхідних та вихідних даних. З метою систематизації було виділено три основні групи множин вхідних параметрів: група множин динамічно змінюваних параметрів, група множин граничних значень параметрів (рис. 4).

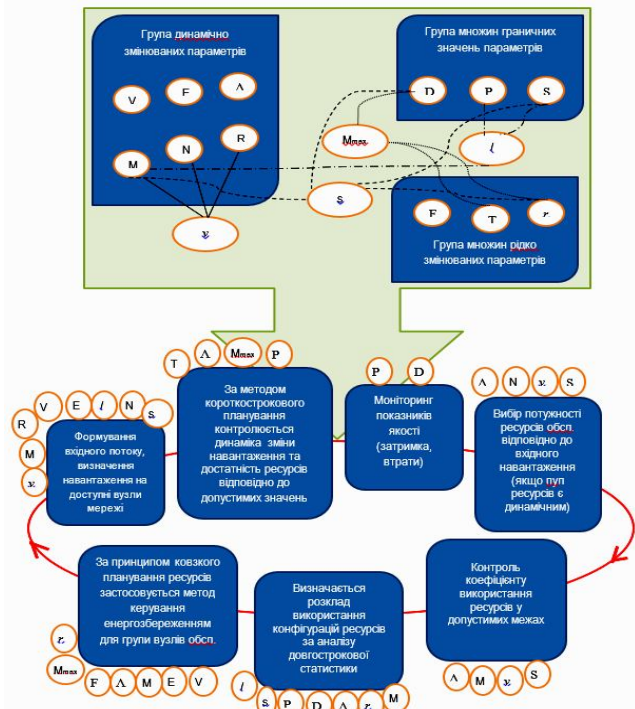


Рис. 4. Технологічний процес управління процесом обслуговування телекомунікаційних сервісів

Група динамічно змінюваних параметрів: $V = \{V\}$ – множина вузлів доступних для обслуговування; $E = \{e_{ij}\}$ – матриця зв'язності вузлів у досліджуваній момент часу; $\Lambda = \{\lambda_{ij}\}$ – множина розрахункового навантаження j -го типу сервісу на i -й вузол обслуговування; $R = \{R_{ij}\}$ – матриця доступних ресурсів, R_{ij} – кількість доступних ресурсів j -го типу в i -му вузлі обслуговування; $N = \{n_i\}$ – множина кількостей паралельних каналів обслуговування у вузлі, n_i – кількість каналів для обслуговування у i -му вузлі; $M = \{\mu_i\}$ – множина інтенсивностей обслуговування у вузлі, μ_i – поточна розрахована інтенсивність обслуговування заявок у i -му вузлі.

Група множин граничних значень параметрів: $D = \{d_{ij}\}$ – множина граничних значень затримки у вузлі для різних типів сервісів, d_{ij} – граничне значення для затримки j -го типу сервісу в i -му вузлі обслуговування; $P = \{P_{ij}\}$ – множина граничних значень для показника втрат пакетів для різних типів сервісів, P_{ij} – допустима ймовірність втрат пакетів i -го типу сервісу у вузлі обслуговування; $S = \{(S_{\min i},$

$S_{\max i}$)} – множина пар граничних значень коефіцієнту оптимального використання ресурсів i -го вузла, де $S_{\min i}$ – мінімальне оптимальне значення коефіцієнту використання ресурсів (від 0 до 100%) i -го вузла, $S_{\max i}$ – максимальне оптимальне значення коефіцієнту використання ресурсів (від 0 до 100%) i -го вузла.

Група рідко змінюваних параметрів: $F = \{f_i(\tau, \rho)\}$ – множина функцій енергоспоживання вузлів, які залежать від навантаження та конфігурації вузла. $\tau = \{\tau_{\text{conf } ij}\}$ – матриця можливих конфігурацій вузла, де i – номер вузла, j – номер конфігурації; T – множина допоміжних параметрів часу, які використовуються для формування статистичних вибірок та формування розкладу.

Група множин, що утворюється для організації розрахунків: M_{\max} – множина максимальної кількості заявок, які можуть бути обслужені у i -му вузлі за вибраної конфігурації системи, розраховується, розраховується для кожного типу сервісу на основі множин граничних значень (рис. 3); s – множина допустимих довжин черг для різних типів трафіків залежно від поточної конфігурації системи, розраховується на основі вимог до затримки, коефіцієнту використання ресурсів, та поточної інтенсивності обслуговування

Моделювання системи

При моделюванні телекомунікаційної мережі у системі GPSS, робота мережі була представлена як множина вузлів обслуговування з'єднаних логічними каналами. Розглядалися вузли обслуговування таких типів: вузли доступу 1-го типу (фіксованої потужності), вузли доступу 2-го типу (програмно керовані, змінюваної потужності), транспортні вузли 1-го типу (фіксованої потужності), транспортні вузли 2-го типу (програмно керовані, змінюваної потужності), контролери транспортних вузлів 2-го типу, вузли ядра мережі 1-го типу (фіксованої потужності), вузли ядра мережі 2-го типу (віртуальні, змінюваної потужності), вузли системи онлайн тарифікації.

Досліджувався процес обслуговування службових потоків: запитів на встановлення з'єднання різними типами сервісів. Навантаження було згенеровано відповідно до статистичних функцій запитів. Випадкові потоки подавалися на обслуговування на вузли доступу першого та другого типу. Далі запити обслуговувалися відповідно до логічного ланцюга обслуговування – з певною ймовірністю розподілялися між вузлами транспортної мережі, якщо запит попадав на транспортний вузол другого типу, то він переадресовувався на контролер транспортних вузлів, якому підпорядковувався відповідний транспортний вузол. Далі запиту присвоювалася послідовність транспортних вузлів обслуговування, після проходження яких запит подавався на обслуговування до множини вузлів ядра мережі, де йому випадково присвоювалася послідовність вузлів обслуговування ядра мережі першого або другого типу, а також блог онлайн тарифікації.

Особливістю дослідження було виділення заданої(змінної) кількості каналів обслуговування для ко-

жного вузла обслуговування, а також організація ресурсів вузла обслуговування та зайняття ресурсів на час обслуговування запиту залежно від типу запиту.

Досліджувалися такі показники якості обслуговування запитів у розробленому середовищі обслуговування, як час виконання запиту – середній сумарний час, який запит проводить у системі, коефіцієнти втрат запитів, через перевищення довжини черги до обслуговуючого пристрою, коефіцієнти втрат для окремо взятих вузлів обслуговування, та сумарні втрати по системі. Коефіцієнти використання ресурсів обслуговування для окремо взятих вузлів та інтегральний коефіцієнт використання ресурсів мережі.

Без застосування розроблених методів обслуговування було підбрано такі параметри вхідних потоків та вузлів обслуговування, щоб показники якості обслуговування були нижчі за гранично допустимі значення. Однак використання ресурсів системи було неефективним, тобто середнє значення завантаженості ресурсів – 20%.

У той же час, як було показано у дослідженні [6], при завантаженні обчислювальних ресурсів у діапазоні від 50% до 80% електрична енергія використовується найбільш ефективно. У дослідженні [6] проводилися експериментальні дослідження по контролю споживання електричної енергії серверами дата-центру при обслуговування потоку обчислювальних задач, експериментально було отримано функціональну залежність спожитої енергії від об'єму використаних ресурсів (оперативної пам'яті, частки процесорного часу, використаного дискового простору).

З метою дослідження поведінки комплексної гетерогенної мережі роботу наведеної імітаційної моделі було вдосконалено за рахунок впровадження системи керування потоками та ресурсами обслуговування у вузлах. Оптимізація проводилася у декілька етапів. Першим етапом було сформувані вхідний потік на вузол обслуговування, таким чином, щоб середнє значення коефіцієнту завантаженості ресурсів в процесі обслуговування попадало в діапазон [50%,80%], затримка у вузлі не перевищувала допустиме значення (10мс), виконувалися ймовірність втрат пакетів у вузлі не перевищувала 0,005. Для цього для кожного вузла відповідно до поточної конфігурації ресурсів виконувалася розрахунок кількості запитів які спрямовувалися на обслуговування у даний вузол за методом формування вхідного потоку. Під формуванням вхідного потоку розуміється виділення частки загального навантаження на вузли доступу пропорційно розрахунковим значенням допустимого навантаження відповідних вузлів.

З метою імітації реальних процесів у телекомунікаційному середовищі, середнє значення вхідного навантаження на вузли доступу змінювалося відповідно до заданої функції, яка відображає статистику реальних запитів. Для забезпечення ефективного керування ресурсами розраховуються можливі конфігурації ресурсів вузлів обслуговування. Вузлі першого типу

мають фіксовану конфігурацію, а вузли другого типу можуть гнучко змінювати кількість ресурсів обслуговування. Тому відповідно до методу вибору потужності обслуговуючого пристрою, для забезпечення процесу обслуговування на заданому рівні якості для багатоканального обслуговування виконується розрахунок потужності ресурсів обслуговування. З метою планування процесу керування обслуговуванням, за методом побудови розкладу залучення ресурсів розраховуються моменти переключення між конфігураціями системи. З метою контролю достатності ресурсів у вузлах обслуговування ведеться моніторинг кількості заявок, що надходять на обслуговування у одиницю часу. Відповідно до запропонованого методу контролю проводиться аналіз достатності ресурсів, для цього оцінюється статистична інформація за останні 10 хвилин, а також прогнозується навантаження на наступні 2 хв.

Якщо метод короткострокового прогнозування навантаження показав, що у наступні 2 хвилини поточної конфігурації ресурсів буде недостатньо для обслуговування потоку, система переводиться на більш потужну конфігурацію ресурсів. Проведене моделювання показало, що при використанні низки запропонованих методів, загальна кількість ресурсів які було залучено для обслуговування потоку зменшилась на 19%, а середній коефіцієнт використання ресурсів збільшився з 20% до 45%, що підтверджує ефективність запропонованих рішень.

ВИСНОВКИ

Запропонований комплекс методів керування якістю обслуговування гетерогенних систем дозволяє оптимізувати використання ресурсів мережі зі збереженням заданих параметрів QoS. Система контролю на основі показників якості обслуговування визначає кількість додаткових ресурсів, яку необхідно залучити в поточний момент часу. Таким чи-

ном можна розширити можливості мережі у моменти пікового навантаження і уникнути простою ресурсів під час зменшення інтенсивності потоку.

Для доведення ефективності запропонованих методів було проведено моделювання у системі GPSS. Результати моделювання показали, що застосування комплексної системи керування якістю обслуговування дозволяє оптимізувати використання ресурсів мережі під час обслуговування абонентів.

Список літератури

1. Беблей М.І. Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритетизації потоків у маршрутизаторах / М.І. Беблей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко // Системи обробки інформації Національний університет "Львівська політехніка". – , 2016. – Випуск 5 (142)
2. Skulysh M. Planning the loading of data centers' resources based on download statistics / M. Skulysh, L. Globa // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапартобудування, No 65 (2016), сс. 62-72
3. Skulysh M. The method of resources involvement scheduling based on the long-term statistics ensuring quality and performance parameters / M. Skulysh // International Conference. Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo). – 2017.
4. Skulysh M. The method of calculating the optimum load on the LTE base station / M. Skulysh // IEEE 2nd International Conference Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT'2017). – Lviv, Ukraine. – 2017.
5. Stepurin O. Experimental research of power consumption in distributed data center / O. Stepurin, L. Globa // Proceedings of 2015 1st Int. Conf. on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015), Lviv, Ukraine, October 29 – November 1, 2015, p. 15-17

Надійшла до редколегії 26.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Стасев, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЛОЖНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

М.А. Скулиш, Е.А. Вольвач, Л.С. Глоба

Основная проблема управления качеством обслуживания телекоммуникационной сети заключается в том, что оператор мобильной связи руководствуется только собственной инфраструктурой обслуживания абонентов и применяемыми технологиями. Но на сегодняшний день существует возможность привлечения дополнительных арендованных ресурсов сервера для обслуживания большего количества абонентов и улучшения показателей QoS. В данной статье предложен комплекс методов для управления качеством обслуживания гетерогенных телекоммуникационных систем. Проанализированы основные проблемы контроля качества комплексной сети, связанные с привлечением дополнительных ресурсов для обслуживания абонентов. Сформулирована задача определения необходимого количества дополнительных ресурсов в текущий момент времени и предложены способы ее решения.

Ключевые слова: сеть GSM, качество обслуживания в ТКС, оптимизация ресурсов сети, динамическое управление ресурсами, управление параметрами QoS.

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN COMPLEX HETEROGENEOUS TELECOMMUNICATION SYSTEMS

M.A. Skulysh, Ye.O. Volvach, L.S. Globa

The main problem of quality management of the telecommunications network is that the mobile operator is guided only by its own customer service infrastructure and by the used technologies. However, today there is an opportunity to implicate additional leased server resources to serve more subscribers and improve QoS performance. This article proposes a set of methods for managing the quality of service of heterogeneous telecommunication systems. The main problems of quality control of an integrated network, connected with the implication of additional resources for servicing subscribers, are analyzed. The problem of determining the necessary number of additional resources at the current time is formulated and the ways of its solution are proposed.

Keywords: GSM network, quality of service in TCS, optimization of network resources, dynamic resource management, QoS parameters control.

ОСОБЛИВОСТІ АПАРАТНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПОМНОЖУВАЧА НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО ДЕРЕВА УОЛЛЕСА

Розглянуті особливості апаратної реалізації помножувача на основі модифікованого дерева Уоллеса. Виконано оцінювання апаратних витрат на його реалізацію при використанні програмованої користувачем вентиляльної матриці Stratix IV фірми Альтера. Проведено порівняння характеристик продуктивності із вбудованим модулем множення, що надається виробником на основі ліцензії.

Ключові слова: процесор цифрових сигналів, апаратний помножувач, дерево Уоллеса, програмована користувачем вентиляльна матриця.

Вступ

Характерною рисою процесорів цифрових сигналів (ПЦС, DSP – digital signal processor) є наявність апаратної підтримки базової операції «множення з накопиченням» (MAC – Multiply and Accumulate) вигляду:

$$Y = Y + A \times B,$$

де Y , A , B – елементи дійсних масивів [3, 6].

Для реалізації алгоритмів ПЦС часто застосовуються програмовані користувачем вентиляльні матриці (ПКВМ, FPGA – Field-Programmable Gate Array), що мають вбудовані спеціалізовані помножувачі (DSP block) [4 – 6].

Проте збільшення кількості та розрядності цих блоків призводить до значного підвищення вартості кристалу. Саме тому задача пошуку ефективних апаратних структур, що дозволяють зменшити вартість реалізації алгоритмів ПЦС при збереженні необхідного рівня продуктивності є актуальною. Взагалі методи прискорення множення можна умовно розділити на логічні і апаратні [1]. Логічні методи дозволяють скоротити час обчислення шляхом застосування більш ефективних алгоритмів множення, зокрема за рахунок застосування надлишкових систем числення і систем з основою більше двох, що зменшують загальну кількість операцій додавання [1]. В апаратних методах акцент робиться на «схемному» скороченні часу обчислення і підсумовуванні часткових добутоків [1, 6, 7]. Оскільки цифровий фільтр працює із потоковими даними, то доцільно використовувати конвеєрну обробку даних замість ітераційних алгоритмів, де один біт результату формується за n ітерацій, при чому кількість додавань не завжди дорівнює кількості ітерацій і залежить від алгоритму.

У загальному випадку апаратні методи прискорення множення зводяться до [1, 6, 7]:

- паралельного обчислення добутоків;
- скорочення кількості операцій додавання;
- зменшення часу поширення переносів при додаванні часткових добутоків.

За структурою апаратні методи поділяються на матричні та деревовидні [1]. Поряд з високою швидкістю важливою перевагою матричних помножувачів є їх регулярність, що особливо істотно при реалізації таких помножувачів у вигляді інтегральних мікросхем спеціального призначення. З іншого боку, подібні схеми займають велику площу на кристалі мікросхеми, причому зі збільшенням розрядності операндів ця площа збільшується пропорційно квадрату числа розрядів [1]. Час конвеєрного виконання операції множення визначається, часом виконання найповільнішої стадії. Для матричного помножувача це – останній суматор в матриці суматорів, його розрядність складає $2n$, де n – розрядність операндів [1]. Скоротити затримку, властиву матричним помножувачам, вдається в схемах з деревовидною структурою [1, 6, 7]. Однією з розповсюджених деревовидних схем множення є дерево Уоллеса.

Метою даного дослідження є оцінювання продуктивності та апаратних витрат на реалізацію помножувача на основі модифікованого дерева Уоллеса.

Властивості схеми множення на основі дерева Уоллеса

У матричних помножувачах кожен частковий добуток додається до суми часткових добутоків (СЧД) за допомогою окремого рядка суматорів. Відповідно, для множення n -розрядних чисел потрібно n таких рядків. В деревовидних помножувачах процес отримання СЧД також реалізується рядками суматорів, але організованих за схемою дерева, завдяки чому кількість рядків скорочується до $\log_2 n$. Так як в помножувачах обох типів кожен рядок вносить затримку, властиву одному повному суматору, кількість рядків фактично визначає загальну швидкість помножувача при не конвеєрному виконанні.

Помножувач на основі дерева Уоллеса включають в себе три рівні (див. рис. 1) [1, 7]:

- рівень формування всіх добутоків;
- рівень стиснення часткових добутоків;
- рівень заключного додавання.

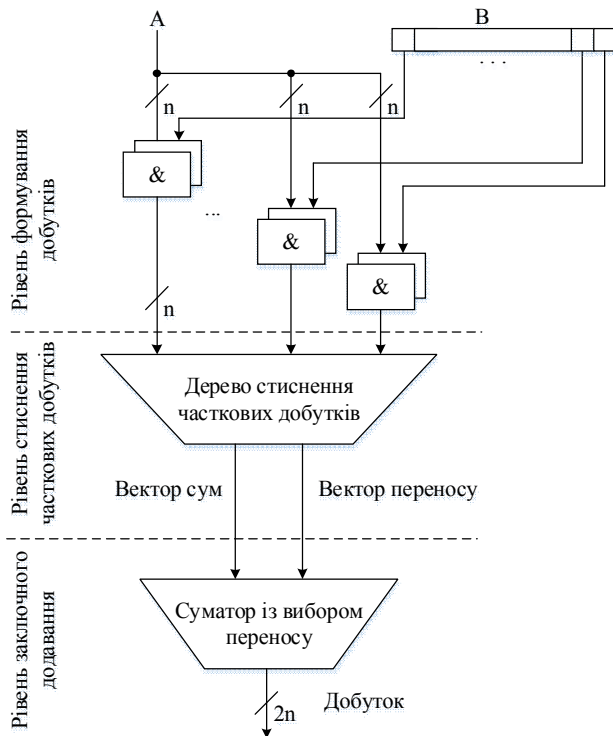


Рис. 1. Помножувач на основі дерева Уоллеса

В найбільш загальному формулюванні дерево Уоллеса – це оператор, що має n входів та $\log_2 n$ виходів, в якому код на виході дорівнює числу одиниць у вхідному коді [1, 6, 7]. Відповідно, найпростішим деревом Уоллеса є однорозрядний суматор. Використовуючи такі суматори, а також напівсуматор, можна побудувати дерево Уоллеса для множення чисел будь-якої розрядності, при цьому кількість суматорів зростає пропорційно величині $\log_2 n$. У такій же пропорції зростає загальний час виконання операції множення, що дорівнює глибині дерева. Основна сфера використання помножувачів зі структурою Уоллеса - множення чисел великої розрядності, але в той же час ця структура найменш регулярна [1, 6, 7].

Характеристики та оцінки порівнюваних структур апаратних помножувачів наведені в таблиці 1 [2, 6, 7], де CPA – суматор із послідовним переносом, CLA – суматор із прискореним переносом, CSELA – суматор із вибором переносу.

Таблиця 1

Порівняння апаратних помножувачів

Тип	Апаратні витрати	Час виконання	Найповільніший елемент
Матричний	$O(n^2)$	$O(n)$	CPA(2n)
Двійкове дерево	$O(\log_2 n)$	$O(\log_2 n)$	CPA(2n)
Дерево Уоллеса	$O(\log_{3/2} n)$	$O(\log_{3/2} n)$	CLA(2n), CSELA(n)
Модифіковане дерево Уоллеса	$O(\log_{6/3} n)$	$O(\log_{6/3} n)$	CLA(2n), CSELA(n)

Суттєвою перевагою дерева Уоллеса є те, що найповільнішим елементом структури є рівень заключного додавання. Відповідно, для підвищення швидкодії всієї структури достатньо замінити один суматор із послідовним переносом на суматор із вибором переносу при великій розрядності або із прискореним переносом, що є неможливим в інших структурах, так як призведе до суттєвого збільшення апаратних витрат. Особливістю суматора із вибором переносу є те, що найдовше коло переносів скорочується вдвоє. Таким чином, задачею дослідження є покращення регулярності структури зі збереженням необхідних характеристик продуктивності.

Спосіб підвищення регулярності структури

Основним елементом немодифікованого дерева Уоллеса є суматор із збереженням переносу з трьома входами і двома виходами, що в свою чергу означає, що кількість входів наступної стадії конвеєра зменшується в 1,5 рази. Тому, якщо змінити співвідношення кількості входів елемента до кількості виходів до 2, отримаємо показники регулярності такі, як у двійкового дерева. На рис. 2 показана схема додавання 9 чисел на основі звичайного дерева Уоллеса.

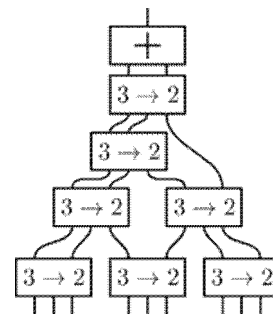


Рис. 2. Приклад дерева Уоллеса для 9 входів

Тому для покращення регулярності застосуємо базовий елемент дерева у якого 6 входів та 3 виходи. Використання саме такої кількості входів пояснюється тим, що у більшості ПКВМ максимальна кількість аргументів (входів) логічної функції складає 6, а всі інші варіанти кількості входів (3, 4, 5) реалізуються за допомогою LUT-6, яка являє собою однорозрядну комірку SRAM-пам'яті на 64 значення та може бути сконфігурована на менше число значень (32, 16, 8 і т.д.).

Приклад синтезу логічної схеми суматора зі збереженням переносу

Як приклад, синтезуємо суматор зі збереженням переносу для дерева Уоллеса, який реалізує представлення суми кодів, що надходять на 6 входів у вигляді трьох значень. Модель CSA у вигляді «чорного ящика», для якого визначені множини вхідних та вихідних сигналів, представлена на рис. 3.

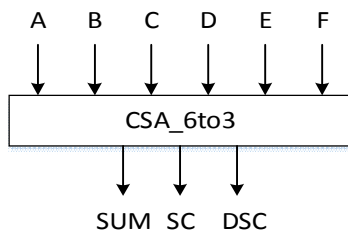


Рис. 3. Модель суматора зі збереженням переносу

На рис. 3 позначені такі вхідні та вихідні сигнали:

- A, B, C, D, E, F – входи суматора;
- SUM – вихід часткової суми;
- SC – вихід зсунутого переносу до наступного розряду;
- DSC – вихід зсунутого переносу через один розряд.

Маємо три логічні функції (ЛФ) шести аргументів тобто, одна LUT-6 на кожну ЛФ. Особливістю такого суматора є те, що значення векторів SC та DSC зсунуті відносно вектора SUM на один та два розряди відповідно.

Словесний опис ЛФ SC та DSC:

1. SC – якщо на двох, трьох або на всіх входах – «1», то на виході також «1», інакше – «0».

2. DSC – якщо на чотирьох, п'яти або на всіх входах – «1», то на виході також «1», інакше – «0».

Запишемо ЛФ суматора зі збереженням переносу для 6 входів та 3 виходів у аналітичному вигляді:

$$\begin{aligned} \text{SUM} &= A \oplus B \oplus C \oplus D \oplus E \oplus F, \\ \text{SC} &= AB \oplus AC \oplus AD \oplus AE \oplus AF \oplus BC \oplus BD \oplus \\ &\quad \oplus BE \oplus BF \oplus CD \oplus CE \oplus CF \oplus DE \oplus DF \oplus EF, \\ \text{DSC} &= ABCD \oplus ABCE \oplus ABCF \oplus ABDE \oplus ABDF \oplus \\ &\quad \oplus ABEF \oplus ACDE \oplus ACDF \oplus ACEF \oplus ADEF \oplus \\ &\quad \oplus BCDE \oplus BCDF \oplus BCEF \oplus BDEF \oplus CDEF [2, 5]. \end{aligned}$$

ЛФ суматора зі збереженням переносу для 3 входів та 2 виходів у аналітичному вигляді:

$$\text{SUM} = A \oplus B \oplus C; \text{SC} = AB \vee BC \vee AC. [2, 4].$$

На рис. 4 показана структура для додавання 24 вхідних векторів.

Оцінювання апаратурних витрат та характеристик продуктивності

Оцінювання апаратурних витрат на реалізацію комбінаційних схем зручно проводити у вигляді кількості вентилів, необхідних для реалізації логічної схеми. Під вентилям традиційно розуміють логічні елементи АБО, ТА, АБО-НІ, ТА-НІ на два входи. Проте, при застосуванні ПКВМ використовується інший підхід – всі логічні функції виражаються в LUT-6, LUT-5, LUT -4, LUT-3, LUT-2, а також підраховується кількість необхідних тригерів за допомогою САПР.

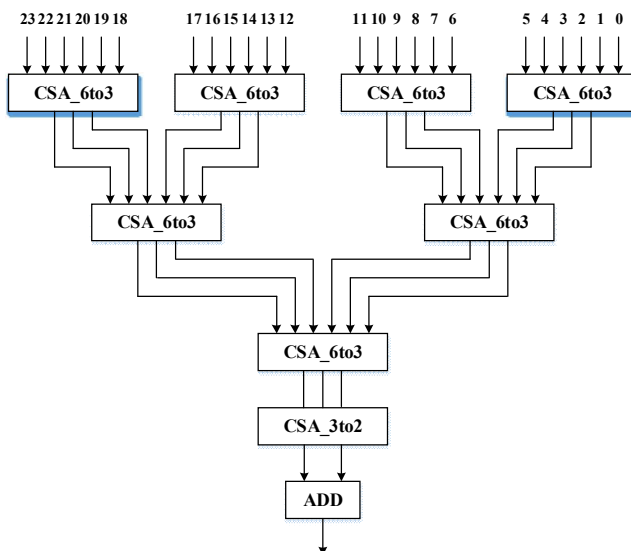


Рис. 4. Приклад модифікованого дерева Уоллеса для 24 входів

Тоді, у першому наближенні, на підставі структурної схеми суматора зі збереженням переносу (див. рис. 3) апаратурні витрати на його реалізацію:

$$W_{\text{CSA}}(n, i) = \lfloor \log_2 i + 1 \rfloor n - \sum_{i=1}^{\lfloor \log_2 i \rfloor} i, \quad (1)$$

де n – розрядність,

i – кількість входів,

$\lfloor \log_2 i + 1 \rfloor$ – кількість виходів,

$\sum_{i=1}^{\lfloor \log_2 i \rfloor} i$ – кількість виходів, що будуть встановлені в «0».

Для трьохвходового суматора зі збереженням переносу ця кількість становить 1, для шестивходового – 3. Це пояснюється тим, що вектори SC та DSC зсунуті відповідно на 1 та 2 розряди вліво, тому їх молодші розряди завжди встановлені в «0». Приблизна загальна кількість LUT визначається за формулою:

$$\begin{aligned} W_{\text{TREE}}(n, i) &= \left(2^{\lfloor \log_2 i / 6 + 1 \rfloor} - 1 \right) \cdot W_{\text{CSA}}(n, 6) + \\ &\quad + W_{\text{CSA}}(n, 3) + 2n, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\lfloor \log_2 i / 6 + 1 \rfloor$ – глибина дерева;

$W_{\text{CSA}}(n, 6)$,

$W_{\text{CSA}}(n, 3)$ – кількість LUT, необхідних для реалізації, відповідно, шести- та трьохвходового суматора зі збереженням переносу;

$2n$ – кількість LUT для суматора з вибором переносу.

На рис. 5 показана залежність приросту тактової частоти в порівнянні із вбудованими помножувачами при різних умовах експлуатації (напряга живлення, температура).

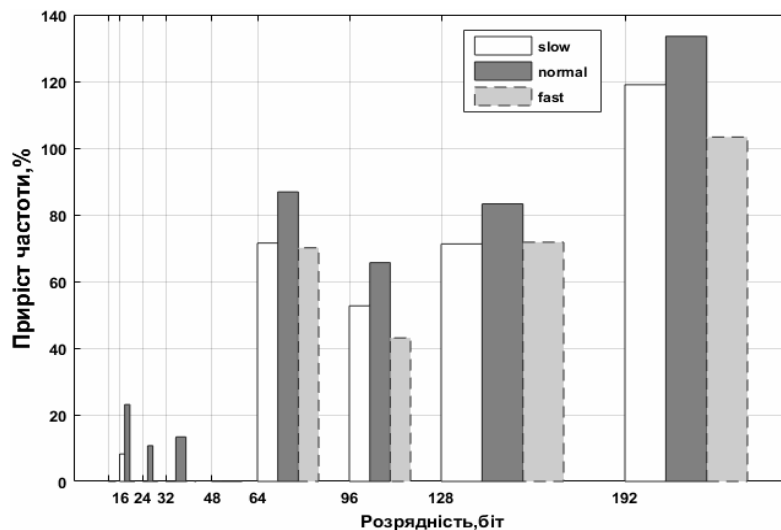


Рис. 5. Діаграма залежності приросту частоти від розрядності даних

Максимальна тактова частота розраховується на основі STA засобами САПР. STA (англ. Static timing analysis) – це метод розрахунку часових параметрів ПКВМ при різних умовах експлуатації, що не вимагає повноцінного електричного моделювання роботи схеми.

Видно, що при розрядності даних до 48 приріст частоти складає приблизно 10% – 20%, а при розрядності більше 64 зростає у два рази та вище.

Висновки

Запропоновано модифікацію дерева Уоллеса, що підвищує регулярність структури шляхом збільшення відношення кількості входів до кількості виходів до 2.

Проведено оцінювання витрат на апаратну реалізацію помножувача на основі модифікованого дерева Уоллеса та порівняння показників продуктивності з убудованими помножувачами.

Запропонований помножувач може афективно використовуватися для реалізації алгоритмів процесорів цифрових сигналів при великій розрядності вхідних даних.

Список літератури

1. Орлов, С.А. Организация ЭВМ и систем : учебник для вузов / С.А. Орлов, Б.Я. Цилькер. - СПб.: Питер, 2011. - 688 с.
2. Кормен, Т., Лейзерсон, Ч., Ривест, Р. Алгоритмы: построение и анализ. — 960 с.
3. Солонина А.И., Улахович Д.А., Яковлев Л.А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. – СПб: БХВ-Петербург, 2001. — 464 с.
4. Earle, J. G. et al U.S. Patent 3 340 388 «Latched Carry Save Adder Circuit for Multipliers» filed July 12, 1965.
5. Joel Hatsch, Winfried Kamp, Siegmund Koppe, Ronald Kunemund, Eva Lackerschmid, Heinz Soldner U.S. Patent U.S. 20 040 159 712 «6-To-3 bit carry-save adder» filed August 19, 2004.
6. Avinash M. Ghorpade, Amey Mahadeo Muchandi «Multiplier Design Using Carry Save Adder», IJAREEIE. Vol. 5, Issue 4, April 2016.
7. Jasbir Kaur and Kavita, «Structural VHDL Implementation of Wallace Multiplier», International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 4, Issue. 4, pp. 1829-1833, April 2013.

Надійшла до редколегії 31.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.А. Кучук, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

ОСОБЕННОСТИ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ УМНОЖИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ДЕРЕВА УОЛЛЕСА

А.И. Тыртышников, М.А. Маврина, П.А. Рудь

Рассмотрены особенности аппаратной реализации умножителя на основе модифицированного дерева Уоллеса. Выполнено оценивание аппаратных затрат на его реализацию при использовании программируемой пользователем вентильной матрицы Stratix IV фирмы Альтера. Проведено сравнение характеристик продуктивности со встроенным модулем умножения, который представляется производителем на основе лицензии.

Ключевые слова: процессор цифровых сигналов, аппаратный умножитель, дерево Уоллеса, программируемая пользователем вентильная матрица.

FEATURES OF HARDWARE IMPLEMENTATION OF THE MULTIPLIER BASED ON THE MODIFIED WALLACE TREE

O.I. Tyrtshnikov, M.O. Mavrina, P.O. Rud

Features of the hardware implementation of the multiplier, which uses the structure of the Wallace tree. Estimated the hardware cost for the implementation of this multiplier using Altera's FPGA Stratix IV. Compared performance characteristics with embedded multiplication block which is provided by vendor on license agreement.

Keywords: digital signal processor, hardware multiplier, Wallace tree, Field-Programmable Gate Array.

Інформаційні технології

УДК 65.018

И.А. Басюк

Национальный авиационный университет, Киев

ОБОБЩЁННАЯ СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Представлен вариант построения обобщенной информационной технологии процесса синтеза диэлектрических структур. Предложенная информационная технология позволяет моделировать и осуществлять синтез структур по пространственно-частотным характеристикам.

Ключевые слова: диэлектрическая структура, модель, синтез.

Введение

В современном промышленном производстве при изготовлении элементов и дискретных компонентов радиоэлектронных устройств, наряду с другими, широкое применение нашли порошковые технологии (трафаретная печать, электрофоретическое осаждение), позволяющие получать диэлектрические покрытия с широким диапазоном параметров при неограниченной номенклатуре материалов. Анализ современных методов повышения эффективности функционирования предприятий с различной серийностью выпускаемой продукции показал, что решение проблемы совершенствования показателей качества производимой продукции и технологических процессов должно осуществляться с использованием последних достижений менеджмента качества, удовлетворяющих требованиям международных стандартов ИСО серии 9000 [1, 2].

Результаты исследований

Теоретические аспекты управления процессом синтеза диэлектрических структур. В качестве метода управления процессом синтеза диэлектрических покрытий был выбран рекомендуемый стандартом ИСО 9001:2000 цикл Деминга - Шухарта PDCA (Plan-Do-Check-Act), включающий в себя функции планирования, организации процесса, контроля его выполнения и регулирования.

Практическая реализация процессного подхода при получении диэлектрических покрытий при производстве элементов радиотехнических устройств предполагает распределение управленческих задач по трем уровням (рис. 1).

Высший управленческий персонал - главный технолог и главный конструктор предприятия являются владельцами процесса получения диэлектрических покрытий и принимают долгосрочные стратегические решения, а также отслеживают

выполнение решений с точки зрения деятельности предприятия.

Средний уровень – начальник технического бюро отдела главного технолога является руководителем процесса и реализует принятые на высшем уровне решения путем текущего планирования и проведения процесса получения диэлектрических покрытий с целью достижения запланированных результатов.

Низший уровень управления – мастера участков и технолог отвечают за текущее состояние процесса получения диэлектрических покрытий.

Максимальная результативность и эффективность работы управленцев каждого уровня зависит от совокупности информации (в электронном виде, в форме бумажных документов, а также в виде опыта и знаний сотрудников), сопутствующей процессу получения диэлектрических покрытий.

Решение управленческих задач на каждом уровне процесса получения диэлектрических покрытий невозможно без их детального описания и последующего анализа. Описание процесса и каждой из входящих в него работ (деятельности, подпроцесса, процесса второго и последующих уровней или функций) должно происходить с применением особых методик и приемов графического изображения процессов, позволяющих исключить многие ошибки на стадии проектирования.

Структурно-функциональная модель процесса синтеза диэлектрических структур. Для решения задачи совершенствования процесса получения композиционных диэлектрических покрытий был выполнен их структурно-функциональный анализ. В качестве лингвистического обеспечения решения данной задачи был использован пакет Международных стандартов моделирования IDEF (Integrated Computer-Aided Manufacturing Definition), позволяющий проанализировать процессы с ключевых точек зрения.

Наибольшее распространение среди аналитиков на этапе концептуального анализа получила методология структурно-функционального моделирования IDEF0 [2], использование которой дает возможность уменьшения дорогостоящих ошибок за счет структуризации процесса на ранних этапах создания интеллектуальной системы, улучшения контактов между пользователями и разработчиками и сглаживания переходов от анализа к проектированию.

Исходя из положений IDEF-моделирования, сложная задача процесса получения диэлектрических покрытий при изготовлении элементов различных устройств была разбита на ряд простых задач, решение которых позволило наиболее эффективно справиться с исходной проблемой.

Диаграмма A0, находящаяся на вершине модели, обобщает весь рассматриваемый процесс. Диаграмма A0 следующего уровня представляет важнейшие подпроцессы с их взаимосвязями, а диаграммы A1, A3, A4 нижнего уровня представляют детализированные функции и так далее до необходимого уровня конкретизации. Фрагмент разработанной структурно-функциональной модели процесса представлен на рис. 2.

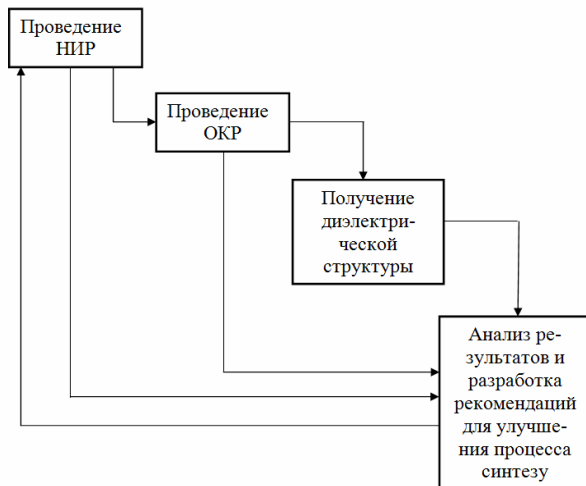


Рис. 2. Фрагмент структурно-функциональной модели процесса получения диэлектрических покрытий

На основе структурно-функциональной модели было проведено построение дерева узлов процесса получения диэлектрических покрытий, которое представляет собой графовую структуру (рис. 3), являющуюся дискретным множеством взаимосвязанных компонентов, где вершины имеют следующий смысл:

A0 – наносить диэлектрические структуры на поверхности приёмо-передающих антенн;

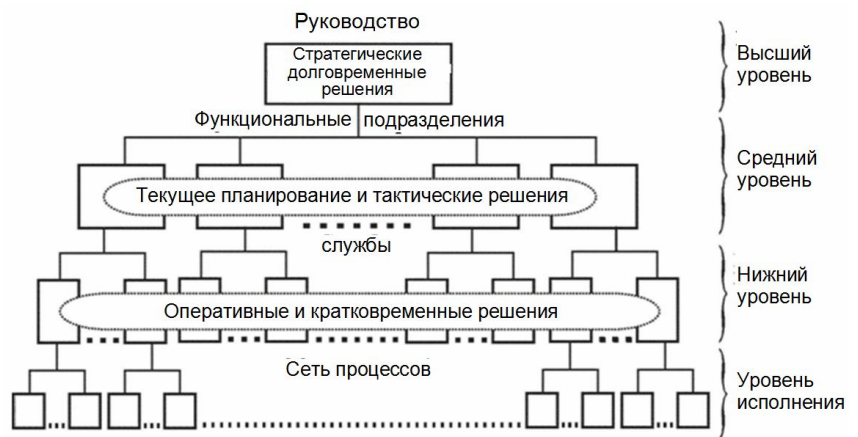


Рис. 1. Иерархическое представление управления сетью процессов в организации синтеза диэлектрических структур

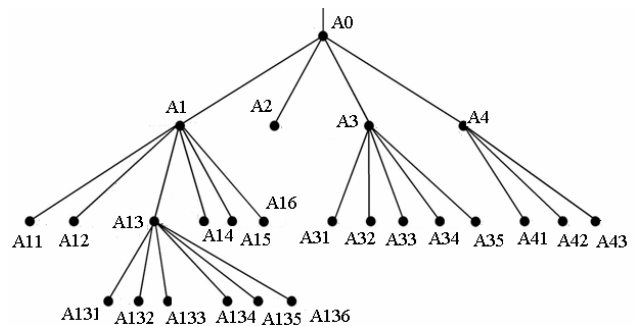


Рис. 3. Дерево узлов процесса синтеза диэлектрических покрытий

- A1 – проводить НИР;
- A2 – проводить ОКР;
- A3 – получить диэлектрическую структуру (ДС) с заданными электрическими характеристиками;
- A4 – анализировать результаты процесса синтеза структур;
- A11 – изучить теорию ДС;
- A12 – разработка ТЗ (техническое задание) на проведение НИР(научно-исследовательская работа);
- A13 – проведение экспериментальных исследований по определению качества ДС;
- A14 – обобщение результатов НИР;
- A15 – сдать НИР заказчику;
- A16 – разработать корректирующие действия;
- A131 – разработать рабочие гипотезы исследования и модели ДС (разработка требуемых продукционных соотношений ДС);
- A132 – разработать методику экспериментальных исследований;
- A133 – подготовить оборудование для проведения экспериментальных исследований (контрольно-измерительная аппаратура, генераторы и т.д.);
- A134 – обработать результаты эксперимента;
- A135 – составить отчёт;
- A136 – разработать корректирующие действия;
- A31 – проведение подготовительной стадии;
- A32 – формировать покрытие;
- A33 – вжигать покрытие;
- A34 – анализировать параметры качества ДС;

- A35 – разработать корректирующие действия;
- A41 – определить критерии синтеза;
- A42 – проводить мониторинг всего технологического процесса и оценку результативности;
- A43 – разрабатывать мероприятия по повышению результативности.

Построение обобщенной математической модели информационного процесса синтеза структур. В соответствии с рекомендациями, приведенными в [2], дополним вершины дерева узлов процесса наборами их признаков Π_i . При этом каждый из признаков последующих уровней конкретизирует признак более высокого уровня. Вершинами последнего уровня являются базовые элементы структуры, дальнейшее расчленение которых нецелесообразно для данной задачи. Наборы характеристик Π_i являются множествами достаточной мощности, включающими в себя совокупности системных характеристик. При этом каждый из признаков последующих уровней конкретизирует признак более высокого уровня. Вершинами последнего уровня являются базовые элементы структуры, дальнейшее расчленение которых нецелесообразно для данной задачи. Наборы характеристик Π_i включают в себя следующие совокупности системных характеристик:

$$\langle N_j^i, F_j^i, S_j^i, I_j^i \rangle,$$

где $N_j^i, F_j^i, S_j^i, I_j^i$ - показатели связей, функций, структуры и истории функционирования j -го объекта i -го уровня с внешней средой соответственно.

Совокупность характеристик на каждом уровне представляет собой ориентированные графы, вершинами которых являются соответствующие характеристики, а ребрами – взаимосвязи между ними. Характер связей с внешней средой вершины каждого уровня дерева процесса получения диэлектрических покрытий отображает мультиграф $H_{jm}^i(N_{jm}^i, h_{j,m}^i)$.

Множеству его вершин соответствует N_{jm}^i , рассматриваемое как взаимодействие вершины с внешней средой (m – количество взаимодействий), а множеством дуг $h_{j,m}^i$ – отношения (связи) между вершинами мультиграфа (n – количество связей). При этом связи между элементами нижнего уровня могут породить элементы на более высоком уровне - элементы, обладающие функциональными связями. Главной частью связей каждой вершины графовой структуры с внешней средой являются входные и выходные параметры. В общем случае входные параметры могут быть разбиты на три группы. К 1-й группе отнесем управляемые параметры, которые можно измерять и целенаправленно изменять. Обозначим их через $x_{j1}^i, x_{j2}^i, \dots, x_{ji}^i$. Соответственно вектор

$$X_j^i = (x_{j1}^i, x_{j2}^i, \dots, x_{ji}^i)$$

назовем вектором управляемых факторов. Ко 2-й группе относятся контролируемые, но не управляемые параметры, которые образуют вектор

$$D_j^i = (d_{j1}^i, d_{j2}^i, \dots, d_{jk}^i).$$

В 3-ю группу входят неконтролируемые и неуправляемые факторы, образующие вектор

$$W_j^i = (w_{j1}^i, w_{j2}^i, \dots, w_{jp}^i).$$

Множество выходных параметров обозначим как вектор отклика $Y_j^i = (y_{j1}^i, y_{j2}^i, \dots, y_{jq}^i)$, который является функцией от входных параметров и некоторого управляющего воздействия $G_j^i = (g_{j1}^i, g_{j2}^i, \dots, g_{js}^i)$:

$$Y_j^i = f_j^i(X_j^i, D_j^i, W_j^i, G_j^i).$$

В свою очередь, деятельность каждого объекта графовой структуры зависит от каждой элементарной функции, характеризующей данный объект, что позволяет представить показатель функции объекта:

$$F_j^i = \Phi_j^i(f_{j1}^i, f_{j2}^i, \dots, f_{jb}^i).$$

При определении структурной характеристики объекта принято различать функциональные, временные и пространственные структуры. Наиболее простым и удобным аппаратом для построения математической модели структуры является теория графов. Функциональная структура каждого подпроцесса, являющегося вершиной графа, показывает упорядоченную последовательность преобразования начального состояния объекта A_0 в конечное A_k , то есть представляет собой граф $S_{\Phi_j^i}(A_j^i, \phi_j^i)$, где A_j^i - вершины графа, отражающие параметры объекта и информацию о состоянии объекта после соответствующего изменения, ϕ_j^i - связи, соответствующие операции изменения объекта.

Временная структура объекта задает точный порядок выполнения всех функций при помощи трех временных отношений: последовательного, параллельного и сдвинутого во времени. Временная структура определяет длительность этапов процесса получения диэлектрических покрытий и образует собою граф $S_{B_j^i}(F_j^i, \tau_j^i)$, где F_j^i - вершины, отображающие функции системы, а τ_j^i - связи, характеризующие временные отношения.

Множество вышерассмотренных признаков описывают состояние процесса получения диэлектрических покрытий на момент начала функционирования. В случае, когда возникает необходимость выбора функционального модуля (бывшего в эксплуатации) из имеющегося множества на данном предприятии, то необходимой характеристикой в данном случае будет история данного модуля. В соответствии с рекомендациями [2, 3] модель истории системы в общем виде можно записать:

$$A_j^i = \Psi_j^i(a_j^i, \eta_j^i, \kappa_j^i, p_j^i, u_j^i, \beta_j^i),$$

где a_j^i - начальное состояние функционального модуля; η_j^i - изменения, возникающие при выполнении технологического процесса; κ_j^i - корректирующие мероприятия для j -го объекта i -го уровня; p_j^i - предупреждающие мероприятия j -го объекта i -го уровня; u_j^i - действия, направленные на постоянное улучшение j -го объекта i -го уровня; β_j^i - состояние функционального модуля после преобразований.

Обобщенная математическая модель процесса получения диэлектрических покрытий представляет

собой совокупность частных математических моделей, рассмотренных выше:

$$M = \left\{ \langle H_i, F_i, S_i, I_i \rangle \mid i = \overline{1, 136} \right\},$$

где с индексом 0 приводятся системные характеристики объекта высшего уровня; индекс i изменяется

от 1 до 4 и характеризует номер подпроцессов первого уровня; индекс j характеризует номера подпроцессов последующих подуровней подуровня. Дополнив вершины дерева (рис. 4) множествами Π_i их характеристик, получим дерево технического решения процесса получения диэлектрических покрытий.

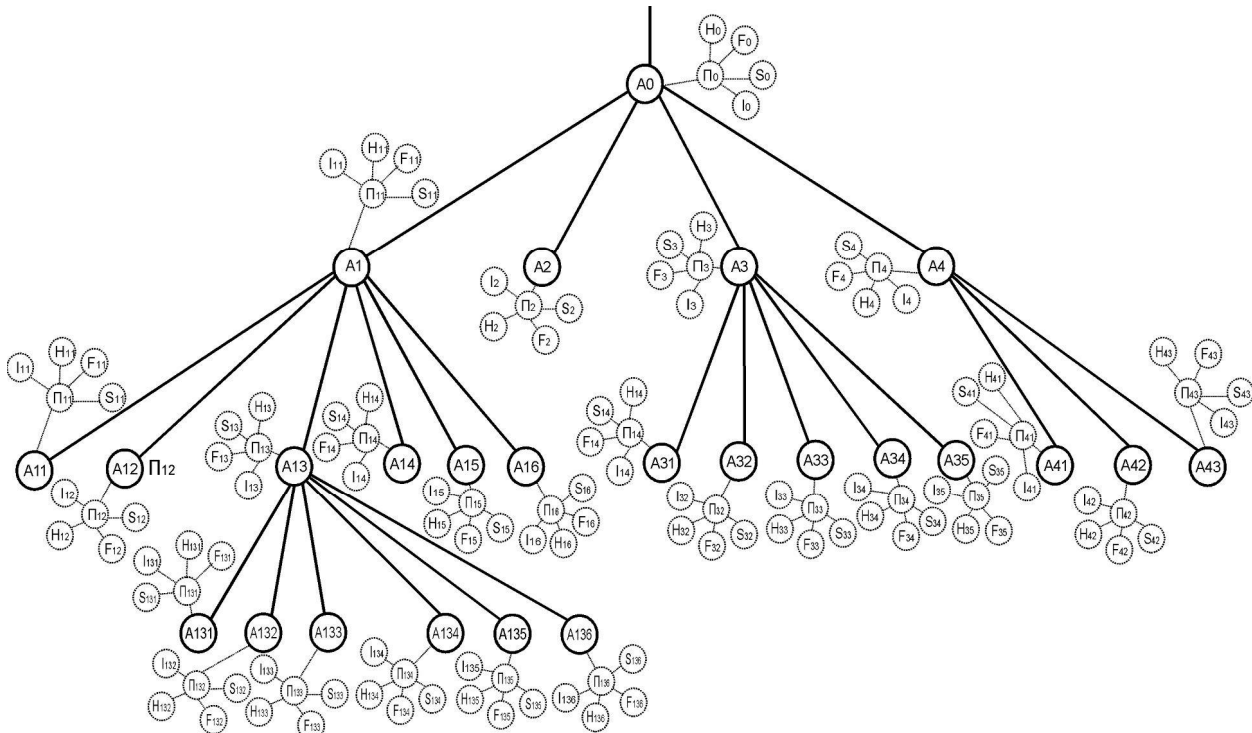


Рис. 4. Дерево технического решения процесса синтеза диэлектрических структур

Заключение

Разработанная структурно-функциональная модель процесса получения диэлектрических покрытий при изготовлении элементов РЭУ позволила выявить ключевые этапы процесса и послужила базой для построения варианта обобщенной математической модели с учетом показателей структуры, функций, связей с внешней средой и истории функционирования для каждого этапа. Установление функциональных связей между компонентами всех уровней и подуровней позволяет по исходным данным синтезировать частное техническое решение и прогнозировать конечные результаты процесса. Использование подобного подхода может послужить основой для

создания автоматизированной системы контроля и управления качеством процесса.

Список литературы

1. Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению деятельности. - М.: Изд-во стандартов. - 2001. - 45 с.
2. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. - М.: Изд-во стандартов. - 2000. - 49 с.
3. Горбатов В.А. Дискретная математика. - М.: АСТ: Астрель, 2006. - 447 с.

Надійшла до редколегії 23.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Козелкова, Державний університет телекомунікацій, Київ.

УЗАГАЛЬНЕНО СТРУКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЦЕСУ СИНТЕЗУ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУКТУР

І.А. Басюк

Представлений варіант побудови узагальненої інформаційної технології процесу синтезу діелектричних структур. Запропонована інформаційна технологія дозволяє моделювати і здійснювати синтез структур по просторово-частотним характеристикам.

Ключові слова: діелектрична структура, модель, синтез.

GENERALIZED STRUCTURE OF INFORMATION TECHNOLOGY OF DIELECTRIC STRUCTURES SYNTHESIS PROCESS

I.A. Basyuk

A variant of constructing a generalized information technology for the process of synthesis of dielectric structures is presented. The proposed information technology makes it possible to model and carry out the synthesis of structures by spatial-frequency characteristics.

Keywords: dielectric structure, model, synthesis.

УДК 519.7

О.С. Бичков¹, В.В. Арделян²¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ² Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕПЕРЕРВНО-ДИСКРЕТНОЇ ДИНАМІКИ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

В роботі досліджується процес керування рухом літального апарату за допомогою узагальненої моделі неперервно-дискретної динаміки - гібридних автоматів. Лінійна система керування зводиться до гібридного автомату й проводиться його дослідження. Інструментом дослідження є гібридні s - та u - функції. Доведено теореми про стійкість, асимптотичну стійкість фазових орбіт гібридних автоматів. Теореми носять достатній характер, умови легко перевіряються.

Ключові слова: методи керування, стійкість, гібридний автомат, керування літаком.

Вступ

Питанням дослідження керованого руху літальних апаратів присвячено багато монографій і статей (див., Наприклад, [1-4]). Літальний апарат розглядається як частина замкнутої системи - об'єкт управління. Для спрощення математичної моделі прийнято, що кожен режим польоту описувати своєю системою диференціальних рівнянь [5]. Прикладами такого рух є керування літаком під час процесу скидання з літаку вантажу, ре конфігурація керування рухом в режимі «голандський крок» та інші.

Постановка проблеми в загальному вигляді. При побудові узагальнюючої моделі необхідно «зібрати» отримані моделі в єдине ціле. Зручним математичним формалізмом для цієї мети є гібридний автомат [6].

Нехай відомо, що динаміка процесу описується різними математичними моделями в N різних станах. Введемо для нумерації цих станів множину $Q = \{1, \dots, N\}$. Будемо називати множину, в якій гібридний автомат описується фіксованою системою диференціальних рівнянь, локальним станом.

Для опису динаміки об'єкта в кожному локальному стані будемо використовувати системи звичайних диференціальних рівнянь. Позначимо через $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, $n \geq 0$, $x_i \in \mathbb{R}$ дійсні фазові змінні, а через $F = \{f_i : Q \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n, i = \overline{1, N}\}$ - множину неперервних вектор-функцій правих частин систем диференціальних рівнянь, які задовольняють умову Ліпшиця. Для опису динамічного процесу необхідно задати початкові умови для кожної системи рівнянь. Початкове значення фазової змінної позначимо через x .

При функціонуванні, динамічний процес переключається між станами. Ці переключення може відбуватися або при досягненні розв'язком певної множини, або в фіксовані моменти часу. Розв'язуючи системи диференціальних рівнянь на кожно-

му локальному стані, ми отримуємо множину розв'язків, які можна склеїти. Таким чином, поведінку реального об'єкта або процесу може бути цілком задовільно описано послідовністю «склеєних» між собою розв'язків систем диференціальних рівнянь на окремих відрізках часу.

Аналіз основних публікацій. Вивченням динаміки неперервно-дискретних систем займалися В.С. Ємельянов [7], М.П. Бусленко [8], В.М. Глушков [9] та інші автори. Дослідженню стійкості гібридних автоматів присвячено роботи М. Браницького, С. Петерссона, Л. Хоу та інших авторів [10 – 14]. У них автори використовують метод мультиплікативних функцій Ляпунова.

Загальним прийнятим підходом вважається необхідність побудови для підсистеми (локального стану) власної функції Ляпунова. Існуючі підходи до дослідження стійкості базуються на умови незростання значень функції Ляпунова на траєкторіях системи в точках переключень. Тобто ці підходи вимагають знаходження траєкторій. Це суттєво обмежує використання таких підходів і суперечить методології, що запропонована А.Ляпуновим.

Метою статті є надання досліднику конструктивних умов для дослідження руху літака і побудови конструктивних методів дослідження стійкості його руху.

Основна частина

Відомо [1,2], що в найпростішому випадку, керовану динаміку літального апарату в сталому режимі польоту можна описати системою лінійних диференціальних рівнянь виду

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (1)$$

де $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $C \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $D \in \mathbb{R}$.

Зауваження 1. Якщо $D > 0$, систему (1) можна переписати в спеціальному вигляді

$$\dot{x}(t) = f_i(x(t)),$$

де $f_1(x(t)) = Ax(t)$, якщо $Cx(t) \geq 0$ і

$$f_2(x(t)) = (A - BD^{-1}C)x(t), \text{ якщо } Cx(t) < 0.$$

Таким чином, зі сказаного у вступі та зауваження 1, випливає, що для побудови загального руху літального апарату необхідно досліджувати стійкість гібридного автомата, тобто коли для опису динаміки в локальних станах використовуються різні системи диференціальних рівнянь.

Динаміку гібридного автомата можна називати неперервно-дискретною динамікою. Слід зауважити, що гібридний автома є узагальнюючою моделлю для різних типів неперервно-дискретної динаміки.

У даній роботі вводиться поняття s - та u -функцій за допомогою яких проводиться дослідження стійкості гібридних систем. За допомогою цих функцій будується спеціальна поверхня, що, обмежує орбіту гібридного автомата. При цьому достатні умови стійкості й нестійкості, що отримані конструктивні й легко перевіряються. Слід також зауважити, що знаходження траєкторій не вимагається. Поведінку об'єкту (процесу) на кожному локальному стані будемо називати неперервною динамікою, а перехід із стану в стан - дискретною динамікою.

На початку функціонування необхідно задавати початкові умови для кожної системи диференціальних рівнянь. Для ініціалізації цих значень введемо множину $Init : Init \subset Q \times R^n$. Запис $(i, y) \in Init$ означає, що динаміка починається з i -го стану та описується i -ю системою диференціальних рівнянь. При цьому початкове значення фазової змінної дорівнює y . Нехай система перебуває в i -му стані. Тоді для фазових змінних виконується умова належності до деякої множини, що описує цей стан. І поки виконується ця умова динаміка буде описуватися i -ю системою диференціальних рівнянь. Для завдання цієї умови введемо позначення $Inv : Inv \subset Q \times R^n$. Для переключення із стану в стан необхідно задати умову такого переходу.

Нехай $Jump$ - задає множинно-значну функцію таку, що $Jump : Q \times R^n \rightarrow P(Q \times R^n)$, де через P позначено множину усіх підмножин. Ця функція задає умову переходу із стану в стан та початкове значення фазової змінної в момент переходу у новий стан.

Означення 1 [14-16]. Гібридним автоматом назвемо кортеж $H = (Q, X, F, Init, Inv, Jump)$.

Нехай переключення станів i відбувається в моменти часу τ_i . Надалі будемо використовувати скінчену або нескінченну послідовність інтервалів $\tau = \{I_i\}_{i=0}^N$, таку, що

$$1) \quad I_i = [\tau_i, \tau_i'] , \quad i < N.$$

$$2) \quad \tau_i \leq \tau_i' = \tau_{i+1}, \quad i \geq 0.$$

3) якщо $N < \infty$, то $I_N = [\tau_N, \tau_N']$, якщо $N = \infty$, то $I_N = [\tau_N, \tau_N')$.

Тобто, для гібридного автомата визначено послідовність інтервалів дійсної прямої, чії кінцеві точки перекриваються.

Для знаходження розв'язку гібридного автомата необхідно знайти множину неперервно-диференційованих функцій, які є розв'язками систем диференціальних рівнянь для кожного окремого стану та задовольняють умові переходу із стану в стан. Сукупність таких розв'язків будемо називати орбітою. Позначимо через T множину усіх можливих τ . Ведемо таке означення.

Означення 2 [14-16]. Фазовою орбітою гібридного автомата H назвемо множину $\chi = \{(i, x)\}$, де $\tau \in T$, i - номер локального стану i $x : \tau \rightarrow R^n$ таке, що

$$1. \quad (i_0, x(\tau_0)) \in Init.$$

2. Для всіх i , що $\tau_i < \tau_i'$, пара $(i, x(t)) \in Inv$ визначає неперервну динаміку на i -му локальному стані; пара $(i+1, x(\tau_{i+1})) \in Jump(i, x(\tau_i'))$ визначає дискретну динаміку, $x(\cdot)$ - розв'язок системи диференціальних рівнянь $\dot{x}(t) = f_i(x(t))$ для всіх $t \in [\tau_i, \tau_i']$.

Означення 3 [12]. Неперервний стан $x = 0$ назвемо тривіальною фазовою орбітою гібридного автомата H , якщо існує непуста множина $\bar{Q} \subset Q$ така, що для всіх $i \in \bar{Q}$ виконується

$$1. \quad (i', z') \in Jump(i, 0) \Rightarrow z' = 0 \text{ й } i' \in \bar{Q};$$

$$2. \quad f(i, 0) = 0 \text{ для всіх } i \in \bar{Q}.$$

Означення 4. Тривіальна фазова орбіта $x = 0$ гібридного автомата H називається стійкою за Ляпуновим, якщо для довільного $\varepsilon > 0$, існує $\delta > 0$ таке, що для всіх $\chi = (i, x)$, що задовольняють умову $|x_0| < \delta$ виконується $|x(t)| < \varepsilon$ для всіх $t \in \tau$.

Через $|\cdot|$ - позначено евклідову норму.

Означення 5. Локальний стан назвемо стійким за Ляпуновим, якщо тривіальний розв'язок системи диференціальних рівнянь, що описує динаміку гібридного автомата в ньому стійкий за Ляпуновим.

Надалі будемо розглядати автономні гібридні автомати. Для гібридних автоматів із стійкими локальними станами існують додатно визначені функції Ляпунова $V_i(x)$, $i = \bar{1}, \bar{N}$, похідні яких в силу систем, які відповідають цим станам, є функціями від'ємно напіввизначеними.

Припустимо, що орбіта гібридного автомата починається із першого стану. Нехай позначення $x^k|_{i \rightarrow j}$ означає, що гібридний автомат переходить

із стану i в стан j і значення x^k береться на множині, що задає умову переходу. Побудуємо таку послідовність $\{x^k\}$, $i = \overline{0, N}$:

$$x^0|_{N \rightarrow 1}, \quad c_0 = V_1(x^0), \quad x^1 = V_1^{-1}(c_0)|_{1 \rightarrow 2}, \quad (2)$$

$$c_1 = V_2(x^1), \quad x^2 = V_2^{-1}(c_1)|_{2 \rightarrow 3}, \dots,$$

$$c_{N-1} = V_N(x^{N-1}), \quad x^N = V_N^{-1}(c_{N-1})|_{N \rightarrow 1} \dots$$

Для дослідження стійкості тривіальної орбіти введемо означення гібридної s -функції.

Означення 6. Назвемо $V(i, x) = \{V_i(x)\}$, $i = \overline{1, N}$ гібридною s -функцією, якщо $V_i(x)$ додатно визначені та для послідовності $\{x_i\}$, $i = \overline{0, N}$ визначеної в (2) виконується $|x^N| \leq |x^0|$.

Як відомо [9], поверхня рівня звичайної функції Ляпунова $V(x) = c$ замкнута. Для гібридних s -функцій це не так. Послідовність (2) задає ступінчасту поверхню рівня для гібридної s -функції.

Означення 7. Похідною гібридної s -функції в силу системи назвемо вираз

$$\frac{dV}{dt} = \left\{ \frac{\partial V}{\partial x}(i, x) f_i(x(t)), \quad i = \overline{1, N} \right\}.$$

Введемо такі позначення:

$$B_r = \{x \in \mathbb{R}^n : |x| \leq r\}, \quad S_r = \{x \in \mathbb{R}^n : |x| = r\}.$$

Теорема 1. Нехай гібридний автомат H із стійкими локальними станами має тривіальну фазову орбіту $x = 0$, та для нього $|Q| < \infty$, $\text{Jump}(i, x) = \{(i+1, x)\}$, для $i = \overline{1, N-1}$, $\text{Jump}(N, x) = (1, x)$. Також нехай задано окіл початку координат $D \subset X$. Нехай переходи із стану в стан відбуваються на гіперплощинах. Якщо для H існує додатно визначена гібридна s -функція $V(i, x): Q \times D \rightarrow \mathbb{R}$ така, що $\frac{\partial V}{\partial x}(i, x) f_i(x(t)) \leq 0$ для всіх $x \in D$ та $i = \overline{1, N}$, тоді $x = 0$ стійка тривіальна фазова орбіта гібридного автомата H .

Доведення. Для простоти викладання покладемо, що $Q = \{1, 2\}$ й орбіта починається із першого стану. Позначимо $\Omega_r(i) = \{x \in \mathbb{R}^n : V(i, x) \leq r\}$. Виберемо довільне $\varepsilon > 0$. Покажемо, що можна, в умовах теореми, знайти $\delta > 0$ таке, що всі орбіти (τ, i, x) для яких виконується $x(\tau_0) \in B_\delta$ задовольняють умові $x(t) \in B_\varepsilon$ для всіх $t \in \tau$.

Виберемо $r \in (0, \varepsilon)$ таке, що $B_r \subseteq D$. Покладемо $a(i) = \min_{x \in S_r} V(i, x)$ для всіх $i \in Q$ й $b(i) \in (0, a(i))$.

Тоді $\Omega_{b(i)}(i) \subseteq B_r$. Далі, нехай $p(i) > 0$ таке, що $B_{p(i)} \subseteq \Omega_{b(i)}(i)$. Покладемо $s = \min_{i \in Q} p(i)$ й нехай

$x(\tau_0) \in B_s$. Якщо не відбудеться перехід в інший стан, то орбіта залишиться в $\Omega_{b(i)}(i) \subseteq B_r$ й, отже, в B_ε . Нехай гібридний автомат переходить в стан 2. Покладемо $c(i) = \min_{x \in S_s} V(i, x)$ для всіх $i \in Q$. Виберемо $d(i) \in (0, c(i))$. Тоді $\Omega_{d(i)}(i) \subseteq B_s$. Далі, виберемо $w(i)$ таке, що $B_{w(i)} \subseteq \Omega_{d(i)}(i)$ й покладемо $\delta = \min_{i \in Q} w(i)$. Нехай ми маємо орбіти (i, x) гібридного автомата H такі, що $|x(\tau_0)| < \delta$ й нехай гібридний автомат перебуває в стані 1. Тоді з умов теореми випливає, що $x(t) \in \Omega_{d(1)}(1) \subseteq B_s \subseteq B_\varepsilon$, $t \in [\tau_0, \tau_0]$.

Якщо переходів у новий стан немає, то теорему доведено. У протилежному випадку, маємо момент часу $\tau_1 = \tau_0$, у якому відбувається перехід й

$$x(\tau_1) = x(\tau_0) \in \Omega_{d(1)}(1) \subseteq B_s \subseteq \Omega_{b(2)}(2).$$

З умови теореми випливає, що

$$x(t) \in \Omega_{b(2)}(2) \subseteq B_r \subseteq B_\varepsilon, \quad t \in [\tau_1, \tau_1].$$

Якщо переходів у новий стан немає, то теорему доведено. Інакше орбіта переходить у початковий стан 1. За умовою теореми для гібридного автомата існує додатно визначена гібридна s -функція тому $|x(\tau_2)| \leq |x(\tau_0)|$. Отже $x(t) \in \Omega_{d(1)}(1) \subseteq B_\varepsilon$. Продовжуючи по індукції для довільного τ одержуємо, що $|x(t)| < \varepsilon$ ($x(t) \in B_\varepsilon$), $t \in \tau$. Теорему доведено.

Основні результати

Розглянемо, які умови необхідно враховувати, щоб тривіальна орбіта гібридного автомата була асимптотично стійкою.

Означення 8. Локальний стан назвемо асимптотично стійким за Ляпуновим, якщо тривіальний розв'язок системи диференціальних рівнянь, що описує динаміку гібридного автомата в ньому асимптотично стійкий за Ляпуновим.

Нехай гібридний автомат має асимптотично стійкі локальні стани. Як ми вже бачили цього не достатньо для того, щоб тривіальна орбіта гібридного автомата була асимптотично стійкою. Одержимо достатні умови для асимптотичної стійкості.

Означення 9. Назвемо траєкторією фазової орбіти гібридного автомата рух точки в фазовому просторі для заданого локальному стані.

Тобто говорячи "траєкторія" будемо вважати, що ми розглядаємо поведінку гібридного автомату у локальному стані.

Теорема 2. Нехай гібридний автомат H із асимптотично стійкими локальними станами має тривіальну орбіту $x = 0$ й для нього виконується

$|Q| < \infty$, $\text{Jump}(i, x) = \{(i+1, x)\}$, для $i = \overline{1, N-1}$ та $\text{Jump}(N, x) = (1, x)$, переходи із стану в стан відбуваються на гіперплощинах.

Нехай також задано окіл початку координат $D \subset X$. Якщо існує додатно визначена гібридна s -функція $V(i, x): Q \times D \rightarrow R$ така, що $\frac{\partial V(i, x)}{\partial x} f_i(x(t)) < 0$ для всіх $x \in D$ й $i = \overline{1, N}$, тоді тривіальна фазова орбіта асимптотично стійка за Ляпуновим.

Доведення. Припустимо, що орбіта починається із стану 1 і гібридний автомат має два стани, тобто $|Q| = 2$. З умов теореми випливає, що тривіальна орбіта стійка за Ляпуновим. Покажемо, що вона є асимптотично стійкою.

Через те, що виконується умова $\frac{\partial V(i, x)}{\partial x} f_i(x(t)) < 0$, то траєкторії будуть перетинати поверхню рівня гібридної s -функції в напрямку ззовні у середину. З нерівності $\frac{dV_i}{dt} < 0$ випливає, що функції $V_i(x(t))$ монотонно спадаючи й мають границю $c \geq 0$, де $c = \min_{i \in \overline{1, N}} \min_{x \in D} V_i(x)$. Для доведення асимптотичної стійкості необхідно показати, що $c = 0$.

Припустимо, що це не так. Тоді в області $\Omega = \{x : c \leq V_i(x) \leq c_0\}$, де $c_0 = V_1(x(t_0))$ для функцій виконується $\dot{V}_i(x) < 0$ й існують $v_i > 0$ такі, що $\dot{V}_i(x) < -v_i$. Обчислимо такі інтеграли

$$I = \int_{t_0}^{t_2} \dot{V}_1(x(s)) ds + \int_{t_2}^{t_3} \dot{V}_2(x(s)) ds + \int_{t_3}^t \dot{V}_1(x(s)) ds.$$

Нехай $-v = \max_i v_i$. Тоді

$$I \leq -v(t_2 - t_0) - v(t_3 - t_2) - v(t - t_3) = -v(t - t_0).$$

З іншого боку

$$\begin{aligned} I &= V_1(x(t_2)) - V_1(x(t_0)) + V_2(x(t_3)) - V_2(x(t_2)) + \\ &+ V_1(x(t)) - V_1(x(t_3)) = V_1(x(t)) - V_1(x(t_0)) + \\ &= V_1(x(t_2)) - V_1(x(t_3)) + V_2(x(t_3)) - V_2(x(t_2)). \end{aligned}$$

Так як $V_2(x(t))$ - функція спадна в локальному стані 2, то $V_2(x(t_3)) \leq V_2(x(t_2))$ й відповідно $|x(t_3)| \leq |x(t_2)|$.

Звідси випливає, що $V_1(x(t_3)) \leq V_1(x(t_2))$. Замінивши $V_1(x(t_3))$ на $V_1(x(t_2))$, ми лише зменшимо праву частину рівності. Отже одержуємо, що

$$I \geq V_1(x(t)) - V_1(x(t_0)) + V_2(x(t_3)) - V_2(x(t_2)),$$

або

$$V_1(x(t)) - V_1(x(t_0)) + V_2(x(t_3)) - V_2(x(t_2)) I \leq -v(t - t_0).$$

Остаточо маємо

$$\begin{aligned} V_1(x(t)) &\leq V_1(x(t_0)) - v(t - t_0) + V_2(x(t_2)) - \\ &- V_2(x(t_3)) \leq V_1(x(t_0)) - v(t - t_0) + 2L, \end{aligned}$$

де $L = V_2(x(t_0))$. Тоді існує T^* таке, що система перебуває в стані 1 і $V_1(T^*)$ буде приймати від'ємні значення. Це викликає протиріччя додатній визначеності функції $V_1(x)$ й тривіальна фазова орбіта гібридного автомата асимптотично стійка. Теорем доведено.

Перейдемо тепер до розгляду питання про нестійкість тривіальної фазової орбіти гібридного автомата.

Означення 10. Локальний стан назовемо нестійким за Ляпуновим, якщо тривіальний розв'язок системи диференціальних рівнянь, яка описує динаміку гібридного автомата в ньому нестійкий за Ляпуновим.

Отримаємо умови, які забезпечують нестійкість тривіальних орбіт гібридних автоматів.

Означення 11. Назвемо

$$V(i, x) = \{V_i(x)\}, i = \overline{1, N}$$

гібридною u -функцією, якщо $V_i(x)$ додатно визначені й для послідовності $\{x^i\}$, $i = \overline{0, N}$ визначеної в (1) виконується $|x^N| \geq |x^0|$.

Будемо використовувати гібридну u -функцію для дослідження нестійкості тривіальної фазової орбіти гібридного автомата.

Теорема 3. Нехай гібридний автомат H з нестійкими локальними станами має тривіальну фазову орбіту $x = 0$ й для неї виконується

$$|Q| < \infty, \text{Jump}(i, x) = \{(i+1, x)\},$$

для $i = \overline{1, N-1}$, $\text{Jump}(N, x) = (1, x)$. Нехай задано окіл початку координат $D \subset X$, переходи із стану в стан відбуваються на гіперплощинах. Якщо для H існує гібридна u -функція $V(i, x): Q \times D \rightarrow R$ така, що $\frac{\partial V(i, x)}{\partial x} f_i(x(t)) > 0$ для всіх $x \in D$ та $i = \overline{1, N}$, тоді тривіальна фазова орбіта нестійка за Ляпуновим.

Доведення. Нехай орбіта починається з першого стану й $|x(t_0)| < \delta$ й $|Q| = 2$. З того що локальні стани нестійкі, випливає, що траєкторії $x(t)$ будуть перетинати поверхні рівня $V_i(x) = c_i$ з середини, отже $|x(t)|$ буде зростати. Покажемо, що при виконанні умов теореми орбіта гібридного автомата, що починається з околу початку координат буде необмежено зростати.

Нехай це не так й орбіта не залишає сфери S_ϵ , а прямує до граничної поверхні $V_i(x) = C$, де C визначається з умови $\{x : V_i(x) = C\} \subseteq S_\epsilon$. Звідси випливає, що для кожного t виконується

$$V_i(x(t)) < C. \tag{2}$$

З того, що для гібридної u -функції виконується умова теореми $\frac{\partial V(i, x)}{\partial x} f_i(x(t)) > 0$, випливає,

що в області $\Omega = \{x : c_0 \leq V_1(x) \leq C\}$, де $c_0 = V_1(x(t_0))$ існують $v_i > 0$ такі, що $\dot{V}_i(x) > v_i$.
 Виберемо $v = \min_i v_i$. Обчислимо інтеграли

$$I = \int_{t_0}^{\tau_2} \dot{V}_1(x(s)) ds + \int_{\tau_2}^{\tau_3} \dot{V}_2(x(s)) ds + \int_{\tau_3}^t \dot{V}_1(x(s)) ds.$$

Тоді

$$I \geq v(\tau_2 - t_0) + v(\tau_3 - \tau_2) + v(t - \tau_3) = v(t - t_0).$$

З іншого боку

$$I = V_1(x(\tau_2)) - V_1(x(t_0)) + V_2(x(\tau_3)) - V_2(x(\tau_2)) + V_1(x(t)) - V_1(x(\tau_3)) = V_1(x(t)) - V_1(x(t_0)) + V_1(x(\tau_2)) - V_1(x(\tau_3)) + V_2(x(\tau_3)) - V_2(x(\tau_2)).$$

Через те, що $V_2(x(t))$ - функція зростаюча в локальному стані 2, то $V_2(x(\tau_3)) \geq V_2(x(\tau_2))$ й відповідно $|x(\tau_3)| \geq |x(\tau_2)|$. Звідси випливає, що $V_1(x(\tau_3)) \geq V_1(x(\tau_2))$. Замінивши $V_1(x(\tau_3))$ на $V_1(x(\tau_2))$, ми лише збільшимо праву частину рівності. Отже одержуємо, що

$$I \leq V_1(x(t)) - V_1(x(t_0)) + V_2(x(\tau_3)) - V_2(x(\tau_2)),$$

або

$$V_1(x(t)) - V_1(x(t_0)) + V_2(x(\tau_3)) - V_2(x(\tau_2)) \geq I \geq v(t - t_0).$$

Остаточно маємо

$$V_1(x(t)) \geq V_1(x(t_0)) + v(t - t_0) + V_2(x(\tau_2)) - V_2(x(\tau_3)) \geq V_1(x(t_0)) + v(t - t_0) - 2L,$$

де $L = V_2(x(t_0))$. З цього випливає, що існує T^* таке, що система буде перебувати в стані 1 й $V_1(x(T)) > C$. Отже, одержали протиріччя з нерівністю (2). Остаточно робимо висновок, що тривіальна фазова орбіта гібридного автомата нестійка.

Зауваження. Наведені теореми легко узагальнити на випадок $|Q| > 2$.

Апробація

Розглянемо приклад. Нехай динаміка гібридного автомату описується чотирма системами лінійних диференціальних рівнянь. Приклад наближено демонструє стійкість динаміки при відновленні руху літака при скиданні вантажу.

$$\dot{x}_i(t) = A_i x(t),$$

де $A_1 = \begin{pmatrix} -1 & -100 \\ 10 & -1 \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} -1 & -10 \\ 100 & -1 \end{pmatrix},$

$$A_3 = \begin{pmatrix} -1 & -20 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, A_4 = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -100 & -1 \end{pmatrix}.$$

Ці системи мають такі фазові портрети

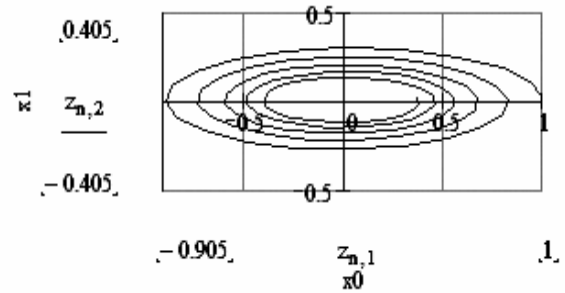


Рис. 1. Фазовий портрет системи з матрицею A_1

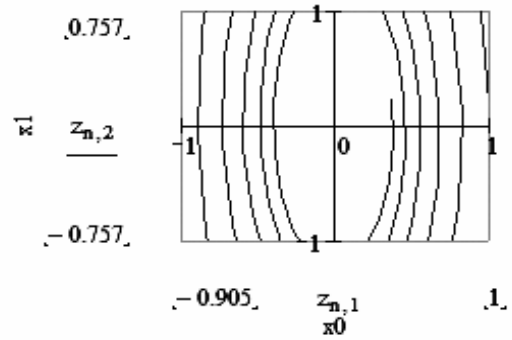


Рис. 2. Фазовий портрет системи з матрицею A_2

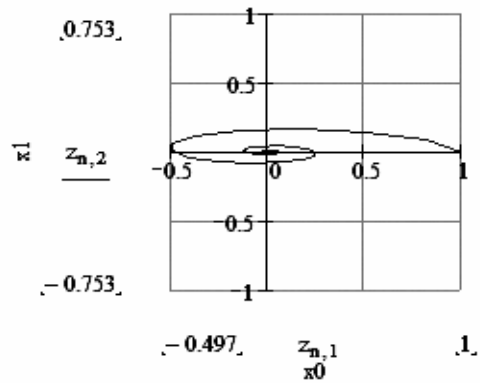


Рис. 3. Фазовий портрет системи з матрицею A_3

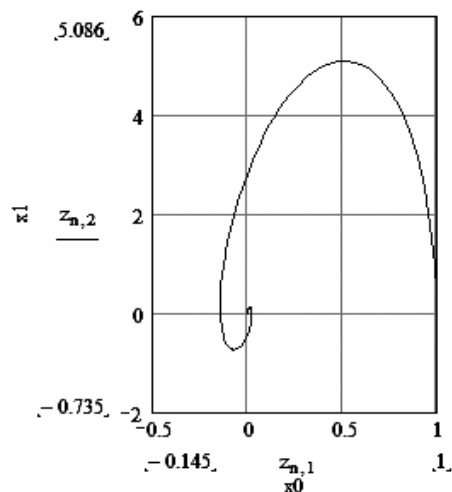


Рис. 4. Фазовий портрет системи з матрицею A_4

Побудуємо для кожної системи, окремо, квадратичну функцію Ляпунова $V_i(x) = x^T H_i x$.

Маємо:

$$H_1 = \begin{pmatrix} 0.275 & -0.022 \\ -0.022 & 2.748 \end{pmatrix},$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 2.748 & 0.022 \\ 0.022 & 0.275 \end{pmatrix},$$

$$H_3 = \begin{pmatrix} 0.035 & -9.2 \times 10^{-3} \\ -9.2 \times 10^{-3} & 0.684 \end{pmatrix},$$

$$H_4 = \begin{pmatrix} 4.219 & 0.037 \\ 0.037 & 0.046 \end{pmatrix}.$$

Нехай при $x_1 > 0$, $x_2 > 0$ динаміка гібридного автомату описується системою 1, при $x_1 < 0$, $x_2 > 0$ - системою 2, при $x_1 < 0$, $x_2 < 0$ - системою 3, при $x_1 > 0$, $x_2 < 0$ - системою 4. Перехід здійснюється на координатних вісях. Усі локальні стани асимптотично стійкі.

Почнемо рух з точки $x^0 = (1, 0)$. Тоді $|x^0| = 1$.

Для визначеної послідовності переходів маємо, що $|x^4| = 2.37 \times 10^{-3}$. Тобто $|x^4| < |x^0|$. Відповідно до теореми 1 отримуємо, що тривіальна орбіта стійка за Ляпуновим.

Висновки

Досліджено процес керування рухом літально-го апарату за допомогою узагальненої моделі неперервно-дискретної динаміки - гібридних автоматів. Лінійна система керування зведена до гібридного автомату й проведено його дослідження. Інструментом дослідження є гібридні s- та u-функції. Доведено теореми про стійкість, асимптотичну стійкість фазових орбіт гібридних автоматів.

Список літератури

1. Остославский И. В., Стражева И. В. Динамика полета. Устойчивость и управляемость летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1969. 467 с.

2. Ракета как объект управления: учебник для студ. вузов / И. М. Издалов [и др.] ; ред. С. Н. Конюхов. - Д. : АРТ-ПРЕСС, 2004. - 541

3. Calise, A. J., S. Lee, and M. Sharma, "Direct Adaptive Reconfigurable Control of a Tailless Fighter Aircraft," AIAA-98-4108, Aug. 1998.

4. Dong-Ho Shin and Youdan Kim, "Reconfigurable Flight Control System Design Using Adaptive Neural Network," IEEE Trans. on Control System Technology, vol. 12, No. 1, 2004, pp. 87-100.

5. Maciejowski J. M. Predictive control with constraints, Pearson Education Limited, Harlow, 2002. 331p.

6. Парийская Е. Гибридный подход к моделированию и качественному анализу динамических систем. Алгоритмы линейной аппроксимации нелинейного гибридного автомата. // Труды 2-ой между. н.-т. конф. «Дифференциальные уравнения и приложения», С.-Петербург, 1998г. - с. 174-177.

7. Емельянов С.В. Теория систем с переменной структурой, М.: "Наука", 1970, - 590с.

8. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем, М.: Издательство Наука, 1978. - 399 с.

9. Программное обеспечение моделирования непрерывно-дискретных систем. Под ред. В.М.Глушкова, М.: Наука, 1975г.- 257с.

10. M. Branicky, Stability of switched and hybrid systems, in Proc. 33-rd Conf. Decision and Control, Lake Buena Vista, FL, Dec. 1994, p.3498--3503.

11. S. Pettersson and B. Lennartson. Stability and robustness for hybrid systems. In Proc. of 35th CDC, 1996, p.1202--1207.

12. F. Filippov. Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides. Kluwer Academic Publishers, 1988.

13. H. Ye, A. Michel, and L. Hou. Stability theory for hybrid dynamical systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 43(4), April 1998, p.461-474.

14. MannaZ., PnueliA. Verifying hybrid systems. Hybrid systems, LNCS736, Springer-Verlag, 1993.

15. Меркин Д.Р.. Введение в теорию устойчивости движения. М., Наука, 1971.

16. Бичков О. Дослідження стійкості тривіальних фазових орбіт гібридних автоматів // Вісник Київського університету. Серія: Кібернетика. - 2005. - №6. - С. 4-8.

Надійшла до редакції 31.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Барабаш, Державний університет телекомунікацій, Київ.

МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНОЙ ДИНАМИКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.С. Бычков, В.В. Арделян

В работе исследуется процесс управления движением летательного аппарата с помощью обобщенной модели непрерывно-дискретной динамики - гибридных автоматом. Линейная система управления сводится к гибридному автомату и проводится его исследование. Инструментом исследования являются гибридные s- и u-функции. Доказаны теоремы об устойчивости, асимптотической устойчивости и неустойчивости фазовых орбит гибридных автоматом. Теоремы носят достаточный характер, условия легко проверяются.

Ключевые слова: динамика полета, методы управления, устойчивость, гибридный автомат, управление полетом.

METHODS OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR INVESTIGATION OF AIRCRAFT CONTINUOUS-DISCRETE DYNAMICS

O.S. Bychkov, V.V. Ardelyan

In the article studies the process of the movement control of an aircraft using a generalized model of continuous-discrete dynamics - hybrid automata. The linear control system is reduced to a hybrid automata. The research tool is hybrid s- and u-functions. Theorems on stability, asymptotic stability, and instability of phase orbits of hybrid automata are proved. Theorems are of sufficient character, conditions are easily verified.

Keywords: flight dynamics, control methods, stability, hybrid automaton, flight control.

УДК 004.891

Д.І. Кацал, М.О. Данова, М.В. Потапова, Л.В. Мандрікова

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків

ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ТРИВИМІРНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ РЕАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ПО ФОТОЗОБРАЖЕННЯМ

Викладено підхід до побудови тривимірних комп'ютерних моделей по фотозображенням наземних об'єктів, зокрема різного роду будівель, з виправленням перспективних відхилень. Проведено критичний огляд існуючих методів та засобів обробки фотозображень. На відміну від існуючих підходів, даний підхід забезпечує якісно новий рівень автоматизації, за рахунок суттєвого скорочення обсягу операцій, що зазвичай виконуються в цьому процесі користувачем. На початку дослідження було поставлено такі задачі: синтезувати модель регулярної структури об'єкта та алгоритм її обчислення по зображенню об'єкта, який би дозволяв вірно визначати регулярну структуру більшого числа об'єктів; розробити метод відновлення текстури об'єкта, що враховує його структуру; розробити метод ректифікації текстур і побудови тривимірної моделі частини об'єкта, видимої на одній фотографії. Показано, що запропонований підхід до побудови тривимірної моделі об'єкта по фотозображенню дозволить по фотографіях при взаємодії з користувачем побудувати тривимірні моделі об'єктів з регулярною структурою, зокрема будівель, за менший час в порівнянні з існуючими аналогами.

Ключові слова: фотозображення, тривимірна комп'ютерна модель, регулярна структура об'єкта, ректифікована структура, оклюзія зображення.

Вступ

Стрімкий розвиток технологій в останнє десятиліття призвів до такого ж швидкого зростання в галузі комп'ютерної техніки та програмного забезпечення. Це стосується повним чином й програм створення комп'ютерної графіки і, зокрема, тривимірного моделювання. Програми тривимірної графіки є на сьогодні одними з самих потужних по своїм можливостям.

Чи не головною такою можливістю виступає достовірна візуалізація віртуального світу, що відіграє важливу роль при створенні у користувача відчуття реальності. Ступінь реалістичності зображення на даний час сильно залежить від точності і якості використовуваних моделей. У системах розширеної реальності для коректного вбудовування віртуальних об'єктів у зображення необхідно точно визначити положення камери в просторі, і оцінити загальне просторове розташування об'єктів спостереження [5].

Одним з головних джерел інформації про об'єкти реального світу є фотозображення, тому в останні 15 років велика увага приділяється розробці методів і систем побудови моделей реальних об'єктів по зображеннях. Однак доведені до комерційного рівня системи, наприклад, Scanoma, ImageModeler, PhotoModeler, вимагають точного виділення вершин, ребер і меж об'єктів на фотозображенні і зіставлення їх вершин, ребер та границь обраної моделі простої форми [10]. Цей процес дуже трудомісткий, тому подібні системи не отримали широкого поширення.

У ситуації, що склалася виникла очевидна потреба в автоматизованих системах побудови тривимірних моделей по зображенням, що не вимагають застосування додаткової апаратури, в яких взаємодія з користувачем зводиться до порівняно невеликої кількості простих операцій.

Одже, *мета статті* полягає у викладенні підходу до побудови тривимірної моделі об'єкта по фотозображенням. Застосування цієї моделі надасть змогу більш автоматизувати процес обробки зображень.

Постановка завдання

Задача полягає у дослідженні алгоритмів та методів побудови тривимірних комп'ютерних моделей реальних об'єктів, з метою зниження обсягу взаємодії з користувачем, що має місце при використанні існуючих методів, а також у розробці нових алгоритмів, що дозволяють по фотозображенням, при взаємодії з користувачем, побудувати тривимірні моделі об'єктів з регулярною структурою, зокрема будівель, за менший час в порівнянні з існуючими аналогами.

Для створення якісних моделей існує ряд способів, але вони вимагають значних витрат часу на ручну роботу і, відповідно, значних матеріальних вкладень.

Для успішної реалізації цього потрібно:

- 1) синтезувати нову модель регулярної структури об'єкта та новий алгоритм її обчислення по зображенню об'єкта, який дозволяє вірно визначати регулярну структуру більшого числа об'єктів, ніж сучасні алгоритми;

2) розробити метод відновлення текстури об'єкта, що враховує його структуру. За рахунок автоматичного відновлення текстури потрібна мінімальна взаємодія з користувачем в порівнянні з аналогами;

3) розробити метод ректифікації текстур і побудови тривимірної моделі частини об'єкта, видимої на одній фотографії.

2. Огляд існуючих методів побудови тривимірних комп'ютерних моделей реальних об'єктів по фотозображенню

Для плоских об'єктів ректифіковане зображення надає змогу компенсувати перспективні відхилення.

Таким чином, для підвищення ефективності процесів, які пов'язані із обробкою супутникових фотозображень потрібно побудувати тривимірну модель, що складається з вертикальних площин, і отримати з вихідних фотографій єдину ректифіковану текстуру.

Найпопулярнішим способом отримання таких текстур є виділення на зображенні чотирикутника, відповідного прямокутника в просторі, наприклад, стіни.

Альтернативним способом є завдання прямокутної системи координат через точки сходу. Точки сходу - це точки на зображенні, де перетинаються проекції паралельних в просторі ліній.

Наприклад, в Google SketchUp користувач повинен задати на фотографії дві пари відрізків, що визначають горизонтальні точки сходу для перпендикулярних площин.

У заданій системі координат можна здійснювати тривимірне моделювання з використанням моделі перспективної геометрії.

Недоліком всіх існуючих методів є необхідність активної взаємодії з користувачем для створення точної ректифікованої текстури.

Метод, в якому використовується аналіз піків автокореляції зображення, підходить тільки для випадків з одним рядком регулярності, яка займає більшу частину зображення без значних оклюзій.

Для більш складних випадків можна використовувати розріджені фрагменти зображення. Вони можуть вибиратися випадковим чином або як околиці особливостей.

Схожі між собою фрагменти групуються за допомогою оцінки деякої моделі регулярності. Якість роботи таких алгоритмів різко падає при аналізі об'єктів з більш складними регулярними структурами.

У задачах визначення структури об'єктів, дослідники часто обмежуються класом об'єктів «будівлі», як найбільш актуальним для практики. Тоді завдання може формулюватися як пошук вікон.

Для вирішення використовується детектор подібний Viola- Jones або евристичні підходи, що враховують схожість кутів вікон і наявність градієнта по периметру вікон.

Вікна сильно відрізняються один від одного, тому поточні результати алгоритмів пошуку вікон не дають фінального рішення.

Кращі алгоритми для інтерпретації фасадів намагаються описати вхідне зображення високорівневою моделлю, наприклад, граматичним висновком [7].

Вибір правил граматики (наприклад, для вертикальних або горизонтальних розділень на прольоти та поверхи) та їх параметрів (наприклад, координат розділень) може виконуватися за допомогою випадкових марковських ланцюгів.

Існуючі алгоритми недостатньо ефективні для зниження рівня оклюзії, до того ж вони залежать від правил граматичного виводу, а також вибору метрик.

Сучасні алгоритми не здатні вирішувати похідні задачі сегментації з гарантованим результатом.

Тому все більша увага на сьогодні приділяється процесу інтерактивної сегментації зображень. Більшість сучасних алгоритмів сегментації є розвитком алгоритму GraphCut. Алгоритм трактує все зображення як граф, кожна вершина якого відповідає пікселю зображення.

Вершини, відповідні сусіднім пікселям, зв'язуються ребрами. Також додаються 2 термінальні вершини, які зветься витоком і стоком, та зв'язуються з іншими вершинами. На ребрах графа визначається вагова функція.

Користувач вказує кілька пікселів (точок), які належать об'єкту і фону. Вершини графа, відповідні точкам об'єкта і фону, зв'язуються відповідно з витоком і стоком ребрами з нескінченно великою вагою.

У графі знаходиться мінімальний розріз, який ділить граф на дві частини.

Пікселі, що потрапили в один підграф з витоком, вважаються об'єктом, решта – фоном. Нескінченна вага ребер між точками забезпечує виконання заданих користувачем обмежень. Чим більше відрізняються кольори сусідніх пікселів, тим вага ребра між ними менше, а значить більш імовірно, що розріз графа пройде між ними.

Для сучасних алгоритмів інтерактивної сегментації зображень текстури об'єктів з регулярною структурою, загороджені об'єктами переднього плану, є складним завданням. Існуючі алгоритми в

основному розраховані на виділення одного об'єкта з гладкою межею на контрастному фоні.

В даному випадку є кілька об'єктів з рваними границями і деколи не сильно відрізняються за кольором від фону.

Існуючі алгоритми відновлення та синтезу зображень можна розділити на два великі класи. Алгоритми першого класу засновані на складанні та вирішенні рівнянь в приватних похідних. Вони добре підходять тільки для відновлення вузьких і невеликих областей, таких як подряпини на фотографіях.

В іншому випадку результат виходить дуже розмитим.

Методи другого класу засновані на копіюванні інформації з іншої частини зображення на невідому область попиксельно або невеликими фрагментами.

Деякі алгоритми активно заповнюють невідому область, часто з використанням функції пріоритету. Інші ж формулює спеціальну функцію енергії, і знаходять таке копіювання фрагментів, яке мінімізує цю функцію.

Сучасні алгоритми дозволяють швидко і якісно відновити зображення реальної природи в невеликих областях без сильної структури.

Текстури об'єктів з регулярною структурою мають явно виражену структуру, що вимагає збереження.

Алгоритми, що враховують особливості об'єктів інтересу, обмежуються простими випадками загороджування і, наприклад, не справляються з випадками, коли об'єкти переднього плану загороджують близько половини осередків.

3. Основні етапи підходу до побудови тривимірної моделі об'єкта по фотозображенню

Основними етапами пропонованого підходу (рис. 1) є:

1. З фотографій створюються прямокутні текстури площин об'єкта, які спрощують подальший аналіз, і будується тривимірна модель об'єкта.

2. За текстурою об'єкта визначається його регулярна структура, в тому числі використовується для клонування тривимірних моделей регулярних елементів.

3. На текстурах об'єкта визначаються сторонні об'єкти, і текстура під ними відновлюється з урахуванням регулярної структури об'єкта.

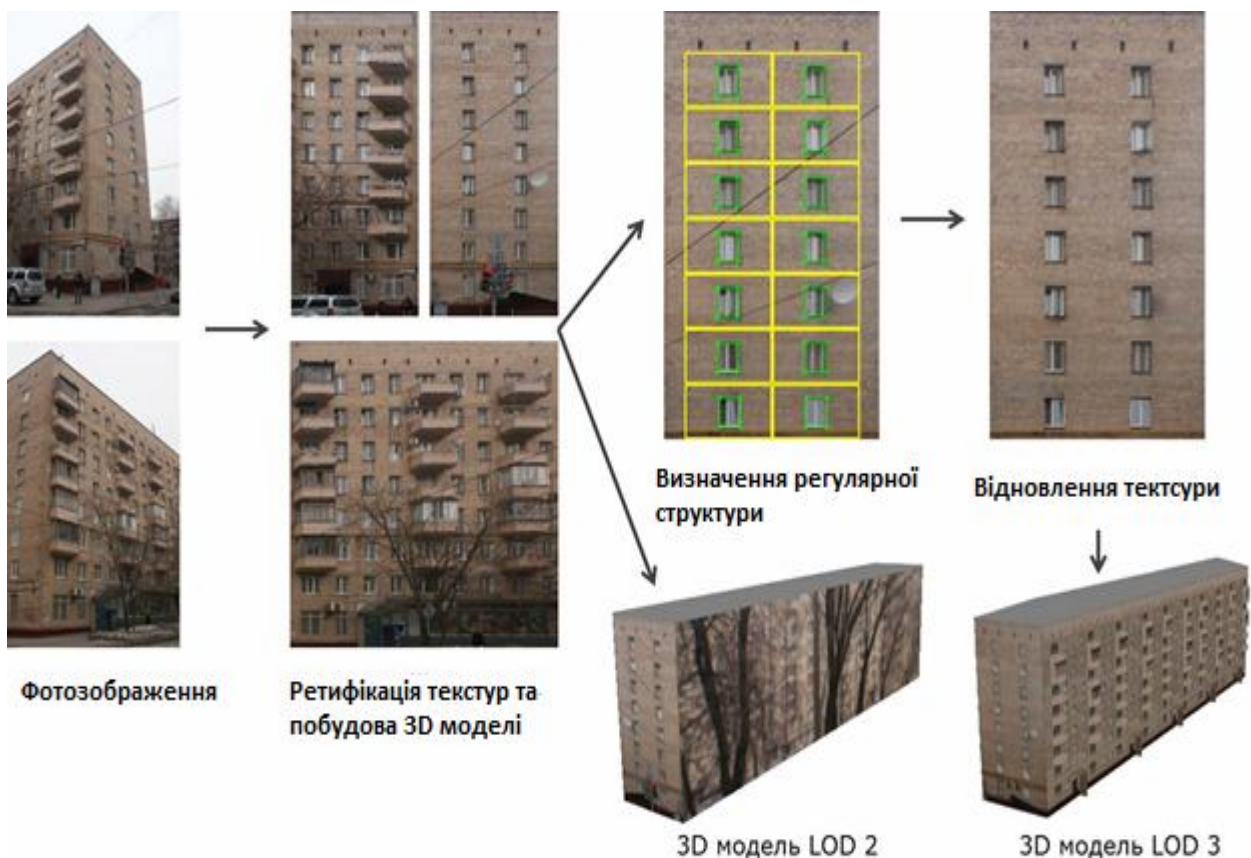


Рис. 1. Схема реалізації підходу до побудови тривимірної моделі об'єкта по фотозображенню

Висновки

Проведено дослідження існуючих методів створення 3D моделей по серії фотознімків.

Пропонований підхід до побудови тривимірної моделі об'єкта по фотозображенню дозволить по фотографіях при взаємодії з користувачем побудувати тривимірні моделі об'єктів з регулярною структурою, зокрема будівель, за менший час в порівнянні з існуючими аналогами.

Список літератури

1. Столов Е.Л. Распознавание лиц на фотографии путем анализа характерных областей. Ученые записки Казанского Государственного Университета. [Текст] / Шлянников А.В. – 2007. – 154с.
2. Юрин Д.В. Алгоритмы факторизации: достоверность результата и применение для восстановления эпиполярной геометрии. [Текст] / Н.В. Свешикова. - СПб. : Питер, 2006. – 217с.
3. Hartley R. Multiple View Geometry in Computer Vision [Текст] / Zisserman A. – Cambridge University Press, 2004. – 672 p., ISBN: 0521540518.
4. Волегов Д.Б. Предварительное грубое совмещение изображений по найденным на них прямым ли-

ниям для построения мозаик, сверхразрешения и восстановления трехмерных сцен. [Текст] / Юрин Д.В. - СПб. : Питер, 2003. -569 с.

5. Барина О. Быстрый метод семантической сегментации изображений для автоматической трехмерной реконструкции городских сцен по одной фотографии [Текст] / В. Конушин, А. Якубенко, А. Конушин. // Тр. конференции Интеллектуализация обработки информации 2008, с. 22-24.

6. Якубенко А. Восстановление структуры и текстуры фасадов городских зданий [Текст] / В. Кононов, И. Мизин, В. Конушин, А. Конушин., 2011, No5, с. 61-75.

7. Triggs B. Matching constraints and the joint image [Текст] / Vokhmitsev J.A. // Workshop on computer Science and Information Technologies CSIT'2006, Karlsruhe, Germany, 2006. P. 177-178.

8. Волегов Д.Б. Параллельный алгоритм для отыскания водяных знаков в изображении. [Текст] / Юрин Д.В. - СПб. :Питер, 2003. -569 с.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Козелкова, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ТРЕХМЕРНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ФОТОИЗОБРАЖЕНИЯМ

Д.И. Кацал, М.А. Данова, М.В. Потапова, Л.В. Мандрикова

Изложен подход к построению трехмерных компьютерных моделей по фотоизображениям наземных объектов, в частности различного рода зданий, с поправкой перспективных отклонений. Проведен критический обзор существующих методов и средств обработки фотоизображений. В отличие от существующих подходов, данный подход обеспечивает качественно новый уровень автоматизации, за счет существенного сокращения объема операций, обычно выполняемых в этом процессе пользователем. В начале исследования были поставлены следующие задачи: синтезировать модель регулярной структуры объекта и алгоритм ее вычисления по изображению объекта, который бы позволял верно определять регулярную структуру большего числа объектов; разработать метод восстановления текстуры объекта, учитывающий его структуру; разработать метод ректификации текстур и построения трехмерной модели части объекта, видимой на одной фотографии. Показано, что предлагаемый подход к построению трехмерной модели объекта по фотоизображению позволит по фотографиям при взаимодействии с пользователем построить трехмерные модели объектов с регулярной структурой, в частности зданий, за меньшее время по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: фотоизображения, трехмерная компьютерная модель, регулярная структура объекта, ректифицированная структура, окклюзия изображения.

APPROACH TO THE BUILDING OF THE THREE-DIMENSIONAL COMPUTER MODEL REAL OBJECTS ON PHOTO IMAGES

D.I. Katsal, M.O. Danova, M.V. Potapova, L.V. Mandrikova

The approach to the construction of three-dimensional computer models based on photoimages of terrestrial objects, in particular various buildings, is corrected, with the correction of prospective deviations. A critical review of existing methods and tools for processing images. Unlike existing approaches, this approach provides a qualitatively new level of automation, due to a significant reduction in the amount of operations usually performed by the user in this process. At the beginning of the research, the following tasks were set: to synthesize the model of the regular structure of the object and the algorithm for its calculation from the image of the object, which would allow us to correctly determine the regular structure of a larger number of objects; to develop a method for restoring the texture of an object, taking into account its structure; To develop a method of rectification of textures and construction of a three-dimensional model of a part of an object visible in one photograph. It is shown that the proposed approach to the construction of a three-dimensional model of an object from a photoimage will allow for the creation of three-dimensional models of objects with a regular structure, in particular buildings, from the photographs in interaction with the user, in less time in comparison with existing analogues.

Keywords: photoimages, three-dimensional computer model, regular object structure, rectified structure, image occlusion.

УДК 004.41:004.056

А.В. Коваленко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький

МАСШТАБИРОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИИ ТЕСТИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

В данной работе разработана и усовершенствована имитационная модель технологии тестирования безопасности на основе положений теории масштабирования имитационных моделей, отличающаяся от известных адаптацией выбора входных операторов управления и данных к повышению требований оперативности разработки и реализации модели, для оценки результатов математического моделирования технологий тестирования безопасности Web-приложений.

Ключевые слова: имитационная модель, тестирование безопасности, разработка программного обеспечения, уязвимости безопасности.

Введение

Известным фактом, подтвержденным множеством актуальных результатов исследования, является целесообразность и актуальность проведения имитационного тестирования с использованием компьютерных и телекоммуникационных средств. Для оценки результатов математического моделирования технологий тестирования безопасности Web-приложений разработаем и усовершенствуем имитационную модель. Проведенные исследования показали, что одним из характерных факторов, влияющих на эффективность разрабатываемой имитационной модели, является существенная зависимость от времени реализации и эксперимента. В то же время большинство существующих имитационных моделей обладают рядом недостатков, связанных с излишними затратами вычислительных ресурсов и времени. В случае моделирования в реальном времени это приводит к снижению точности результатов. Поэтому возникает необходимость масштабирования имитационной модели, которое позволило бы снизить вычислительную, алгоритмическую, технологическую или другие виды сложности её анализа без потери точности моделирования поведения на заданном уровне абстракции.

Анализ литературы показал, что в настоящее время существует несколько типичных ситуаций, когда в процессе имитационного моделирования возможно использование операций масштабирования. Например, при проверке свойств, описанных на более высоком уровне абстракции, чем сама модель или при проверке локализованных свойств (например, свойств одного из компонентов большой модели). Проведенные исследования показали, что большинство авторов [1-14] в первом случае, как правило, модель перестраивают вручную на требуемом (более высоком) уровне абстракции. Во втором случае детальные модели компонентов, проверка свойств ко-

торых не предполагается или считается избыточной, заменяются на «нулевые компоненты». В дальнейшем для валидации таких упрощенных компонент используются знания экспертов. Одной из основных проблем такого подхода является оценка степени адекватности и возможности таких упрощений. В то же время, как показали исследования динамический выбор достаточного уровня моделирования (степени масштабирования) непосредственно в ходе эксперимента может устранить этот недостаток.

1. Постановка задачи масштабирования имитационной модели технологии тестирования безопасности

Для аргументированного выбора и разработки способа масштабирования проведем анализ существующих подходов и алгоритмов.

Проведенные исследования показали, что в настоящее время существуют различные виды зависимости между операторами имитационной модели. Это транзитивные зависимости по данным и управлению. Данные виды зависимости описаны в литературе [1-8]. В работе предлагается использовать каноническое определение зависимости по данным, связывающей два оператора последовательного процесса с уточнением различия по значению переменной. Также для учета зависимости по управлению предлагается использовать результаты приведенных работ [6-14] с уточнением, учитывающим зависимости, возникающие при зацикливании участка программы.

Несколько обособленно в списке зависимостей стоят зависимости по времени выполнения, если модельное время выполнения одного из них зависит от модельного времени выполнения другого. При этом нужно учитывать, что не все операторы имитационной модели продвигают модельное время. В работе этим видом зависимости было решено пренебречь, в связи с отсутствием технологической необходимости.

2. Алгоритмы масштабирования имитационной модели технологии тестирования уязвимостей

2.1 Основные определения

Определение 1. Вершина n является родителем некоторой вершины m (потомка) в графе $G = (N, E, n_0)$, если $(n, m) \in G.E$.

Множество всех потомков вершины n в графе G будем обозначать как $desc(n, G)$.

Определение 2. Путём «way» из $n_i \in G.N$ в $n_k \in G.N$ называется последовательность вершин n_i, n_{i+1}, \dots, n_k , такая что любые две соседние вершины в ней связаны дугой в графе:

$$(n_j, n_{j+1}) \in G.E, j = i, k$$

Запись $n \in \text{«way»}$ означает, что вершина n встречается в пути «way».

Определение 3. Путь «way» называется простым, если он состоит из одной вершины [7].

Определение 4. Максимальным называется путь, который бесконечен, либо заканчивается в вершине, не имеющей потомков [7].

2.2 Масштабирование по управлению

В основе масштабирования по управлению лежат постулаты, характеризующие чувствительность операторов к бесконечному закликиванию, через понятие максимального пути [7], в терминах последовательных процессов логической схемы имитационной модели.

Определение 5. В графе управления G последовательного процесса p оператор $n_j \in G.N$ прямо зависит по управлению чувствительно к закликиванию от оператора $n_i \in G.N$ тогда и только тогда, когда у n_i есть два потомка, n_k и n_z , такие что:

1. Во всех максимальных путях, начинающихся с n_k , встречается n_j , и либо $n_i = n_j$, либо n_j строго предшествует любому вхождению n_i .

2. Существует максимальный путь, начинающийся с n_z , такой, что либо в нём не встречается n_j , либо n_i строго предшествует любому вхождению n_j .

В работе [7, 8] приводится обобщенный алгоритм построения графа зависимостей по управлению. Однако, проведенные исследования показали, что для рассматриваемой задачи имитационного моделирования технологии поиска уязвимостей не требуется нахождение прямой зависимости по управлению. Для корректного моделирования рассматриваемого процесса достаточно использовать более слабое понятие транзитивной зависимости по управлению. Это существенно снизит вычислительную сложность алгоритма масштабирования.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма вычисления транзитивной зависимости по управлению. Следует заметить, что в работе [8] доказана корректность применения транзитивной зависимости по управлению для масштабирования.

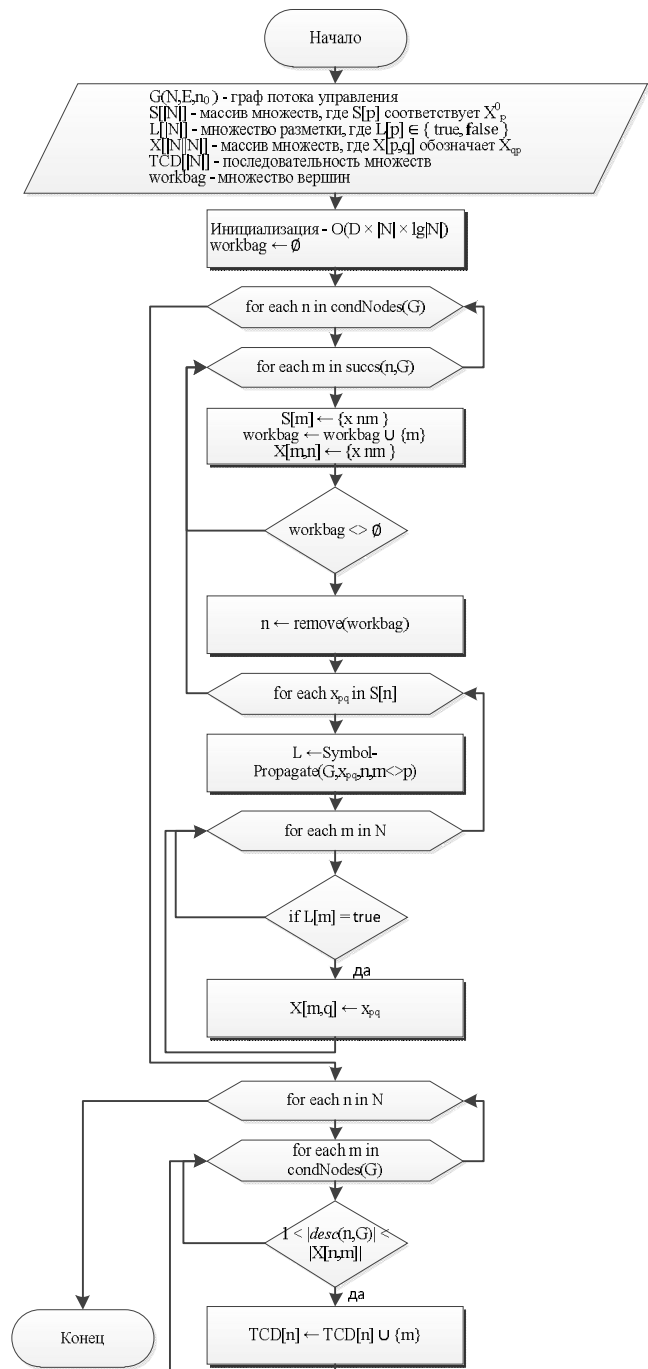


Рис. 1 Блок-схема алгоритма вычисления транзитивной зависимости по управлению

Проведенные расчеты показали, что общая сложность алгоритма равна $O(D^2 \times |N|^2)$. Сравнительная оценка предложенного алгоритма с известным алгоритмом, описанным в [7] показала уменьшение сложности за счёт замены цикла по всем управляющим вершинам с множеством символов размера $D \times |N|$.

2.3 Масштабирование по данным

Как уже было указано выше зависимость по данным описывается в работах [7, 8]. В работе используя формализацию известных определений, уточним её указанием переменной, по значению которой возникает зависимость.

Определение 6. В графе управления G последовательного процесса p оператор $n_j \in G.N$ зависит по данным от оператора $n_i \in G.N$ по переменной v тогда, когда существует переменная $v \in p.V_{ар}$, такая что:

1. Существует непростой путь «way» из n_i в n_j , такой что для любого $n_k \in \text{«way»} - \{n_i, n_j\}$ [7].
 2. $v \in p.\text{def}(n_i) \cap p.\text{ref}(n_j)$ [7].
- На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма вычисления транзитивной зависимости по данным.

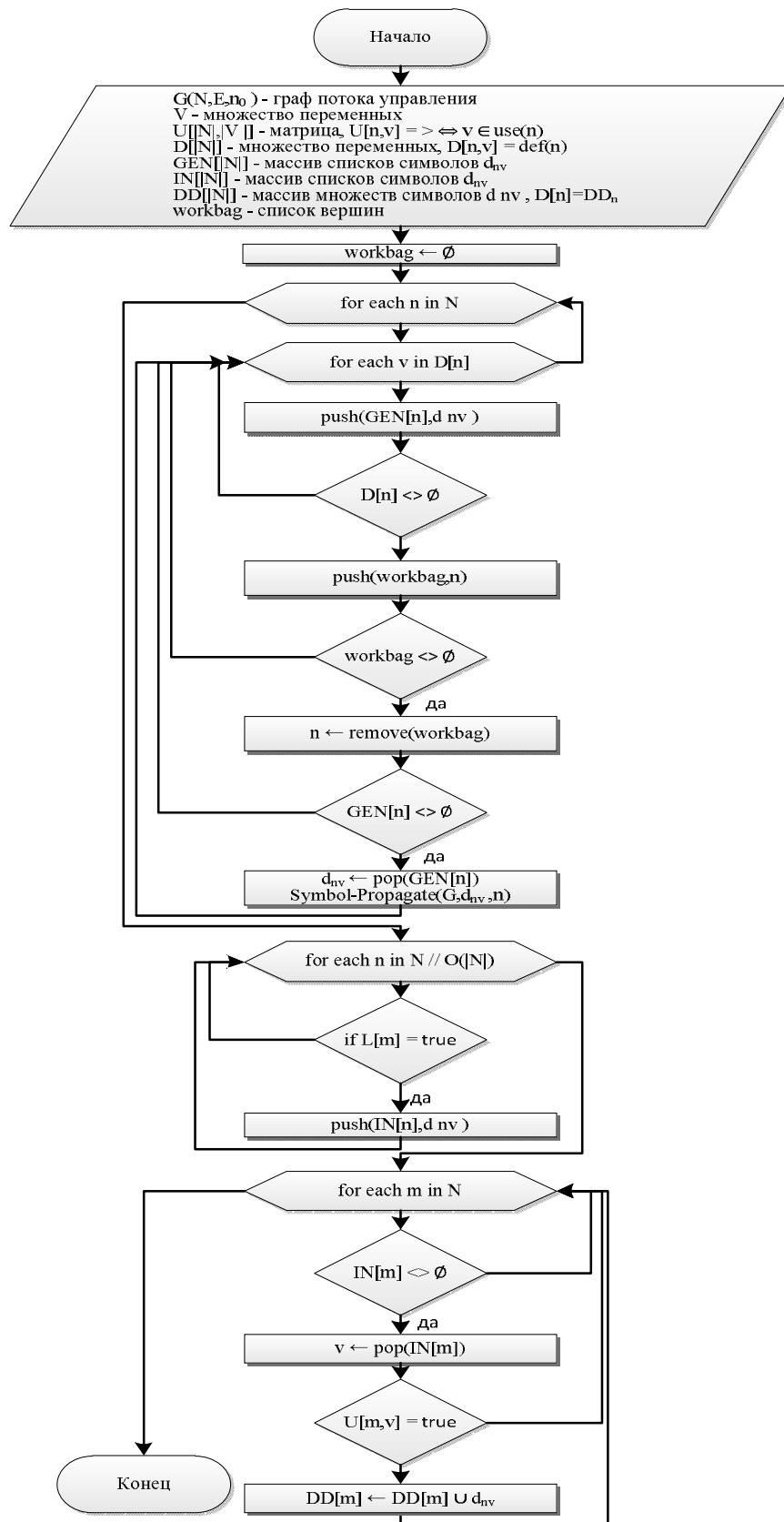


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления транзитивной зависимости по данным

Оценка и расчеты вычислительной сложности представленного алгоритма показали, что общая сложность алгоритма составит $O(|V| \times |N|^2)$.

Воспользуемся данными алгоритмами для усовершенствования имитационной модели технологии тестирования уязвимостей.

Выводы

В работе получила дальнейшее развитие имитационная модель технологии тестирования безопасности на основе положений теории масштабирования имитационных моделей.

Отличительной особенностью разработанной имитационной модели является адаптация выбора входных операторов управления и данных к повышению требований оперативности разработки и реализации модели, для оценки результатов математического моделирования технологий тестирования безопасности Web-приложений.

Список литературы

1. Maven – Introduction: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://maven.apache.org/what-is-maven.html>.
2. Maven – POM Reference: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://maven.apache.org/pom.html>.
3. Gamma E. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. / Erich Gamma. – Reading, Mass. : Addison-Wesley, 1995.
4. Fowler M. Inversion of Control Containers and the Dependency Injection pattern: [Електронний ресурс] / Martin Fowler. – Режим доступу: <https://martinfowler.com/articles/injection.html>.
5. Spring Framework: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://projects.spring.io/spring-framework/>.
6. Ranganath V., Amtoft T., Banerjee A., Dwyer M., Hatcliff J. A new foundation for controldependence and slicing for modern program structures. Technical report 8, santos lab, Kansas State University, 2004.
7. Савенков К. О. Использование зависимостей при масштабировании имитационных моделей. In Методы и средства обработки информации. Труды второй Всероссийской научной конференции, pages 428–434. - М.: Изда-

тельский отдел факультета Вычислительной Математики и Кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005.

8. Семенов С.Г., Швачич Г.Г., Карпова Т.П., Волнянський В.В. Застосування багатопроцесорних систем для удосконалення технологічних процесів // Зб. наукових праць. Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 3(140) С.221-226.

9. Коваленко А.В. Методы качественного анализа и количественной оценки рисков разработки программного обеспечения / А.А. Смирнов, А.В. Коваленко // Збірник наукових праць "Системи обробки інформації". – Випуск 5(142). – Х.: ХУПС – 2016. – С. 153-157.

10. Коваленко А.В. Проблемы анализа и оценки рисков информационной деятельности / А.А. Смирнов, А.В. Коваленко, Н.Н. Якименко, А.П. Доренский // Збірник наукових праць "Системи обробки інформації". – Випуск 3(140). – Х.: ХУПС – 2016. – С. 40-42.

11. Коваленко А.В. Метод качественного анализа рисков разработки программного обеспечения / А.А. Смирнов, А.В. Коваленко, Н.Н. Якименко, А.П. Доренский // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Випуск 2(23). – Харків: ХУПС. – 2016. – С. 150-158.

12. Коваленко А.В. Метод количественной оценки рисков разработки программного обеспечения / А.А. Смирнов, А.В. Коваленко, Н.Н. Якименко, А.П. Доренский // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Випуск 2 (47). – Харків: ХУПС. – 2016. – С. 128-133.

13. Коваленко А.В. Использование псевдобулевых методов бивалентного программирования для управления рисками разработки программного обеспечения / А.А. Смирнов, А.В. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Випуск 1 (37). – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 98-103.

14. Коваленко А.В. Метод управления рисками разработки программного обеспечения / А.В. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Випуск 2 (38). – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 93-100.

Надійшла до редколегії 31.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. С.Г. Семенов, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

МАСШТАБУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕСТУВАННЯ БЕЗПЕКИ

О.В. Коваленко

У даній роботі розроблена і вдосконалена імітаційна модель технології тестування безпеки на основі положень теорії масштабування імітаційних моделей, що відрізняється від відомих адаптацією вибору вхідних операторів управління і даних до підвищення вимог оперативності розробки та реалізації моделі, для оцінки результатів математичного моделювання технології тестування безпеки Web-додатків.

Ключові слова: імітаційна модель, тестування безпеки, розробка програмного забезпечення, уразливості безпеки.

SCOPE OF THE IMITATION MODEL OF SAFETY TESTING TECHNOLOGY

O.V. Kovalenko

In this paper, a simulation model of security testing technology has been developed and improved based on the theory of scaling of simulation models, which differs from those known for adapting the choice of input control and data operators to increasing the requirements for the rapid development and implementation of the model, and for evaluating the results of mathematical modeling of Web application security testing technologies.

Keywords: imitation model, security testing, software development, security vulnerability.

UDC 658.512.032

N.V. Kosenko

O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, Kharkiv

INFORMATION TECHNOLOGY OF MANAGING PARAMETERS OF INFORMATION AND COMMUNICATION NETWORK IN THE SYSTEMS OF CRITICAL INFRASTRUCTURE

The subject matter of the article is the problem of ensuring the requirements for the efficiency and exchange of information with a high level of information security in critical infrastructure systems. The goals of the work is to develop information technology for network structuring, to determine its parameters, to manage the distribution of network traffic, that focus on solving a given set of applications and providing the necessary security of critical infrastructure within the information and communication network. The following tasks were solved in the article: the model of information technology process for managing the parameters of the information and communication network was developed, the block for developing the information structure of the network for the automated control system of technological processes was tested. Such methods as the set-theoretical one and matrix calculations were used; the process models were presented in IDEF0 notation. The following results were obtained. The structure of the information technology which contains three main blocks was suggested. The sequence of processes in each block was considered. The model of the block for developing the structure of the information and communication network was developed. The operation of the synthesiser of the network informational structure was considered regarding the software and hardware complex as a part of the automated control system of technological processes as an example. The functional tasks of the software and hardware complex were determined and distributed among the hierarchical levels of the network. According to the structural diagram of the automated control system, elements of the information model of the network structure were determined. Conclusions: The suggested information technology help solve the following tasks: according to the received parameters of information structure, the requirements for the technical structure of the network can be determined; the adaptive managing the parameters of data flows can be ensured by setting the network to the varied conditions of operation of critical infrastructure system; risks at the stages of structural and parametric synthesis and distribution of network traffic can be assessed and managed.

Keywords: *information technology, critical infrastructure system, information and communication network, adaptive management, process model, data flow intensity.*

Introduction

Under modern conditions, a high level of information support has become a core driver for achieving the goals of critical infrastructure systems (CIS), which raise specific demands for data processing and transmitting [1]. Ensuring the implementation of complex requirements for the quality of solving application problems is the main goal of CIS management. The basis of CIS information support is a global distributed information and communication network (ICN) based on available and advanced communication networks and data transmission using modern telecommunication technologies, which should provide high technical characteristics [2].

Problem setting

The results of the analysis of current state of telecommunication technologies and major protocol decisions indicated the violent rate of CIS development for creating high-speed multiservice networks [3 – 5]. Despite rapid development of physical and channel technologies, CIS capabilities can be fully implemented only due to efficient management of available network resources in the context of increasing requirements for promptness of information exchange.

Available information technologies (IT), which are the basis for the methods of traffic management in CIS, are incapable to ensure the requirements for information exchange promptness under conditions of increasing amounts of circulating information as well as under the dynamic change of data transmission structure [6].

The analysis of major factors affecting traffic management indicated the necessity for developing information technology that is aimed at adaptive management in order to increase the promptness of information transmission in CIS.

In the context of tough requirements for CIS ICN reliability and capacity, analyzing data flows and determining their parameters should be one of the stages of its design. In order to do this, statistical analysis, mathematical modelling, static and dynamic analysis of data sources and flows are used [7, 8]. Data flow modelling should be based on researching the network information structure [9].

The use of adaptive management of network resources consider researching, analyzing and modelling data flow which arise when applied complements operate and interact at network nodes. At present, this task is insufficiently formalized and requires developing complex mathematical models which represent network

information and technical structure as well as data flows available in ICN.

Requirements for consistency and complexity of security facilities cause major problems today [10]. Using efficient procedures and technologies that are based of assessing the risk of processes help ensure CIS strength required for maintaining its operation, infrastructure critical complements and the continuity of management [11].

Hence, the *goal of the article* is developing information technology of network structuring, determining its parameters, managing network traffic aimed at solving a set of application tasks as well as ensuring necessary CIS security in the context of information and communication network. This task should be solved by

developing the methodology of managing network parameters which combine the specificity of the tasks being solved and capabilities of available systems of management, that is the methodology which is adaptive to the conditions of CIS operation.

1. The process model of information technology for managing the parameters of CIS ICN

The suggested information technology implements the sequential operation of three units (Fig. 1):

- 1) the synthesizer of CIS ICN structure,
- 2) the adaptive control block of CIS ICN traffic;
- 3) the block of making decisions on managing ICN risks in order to increase CIS security.

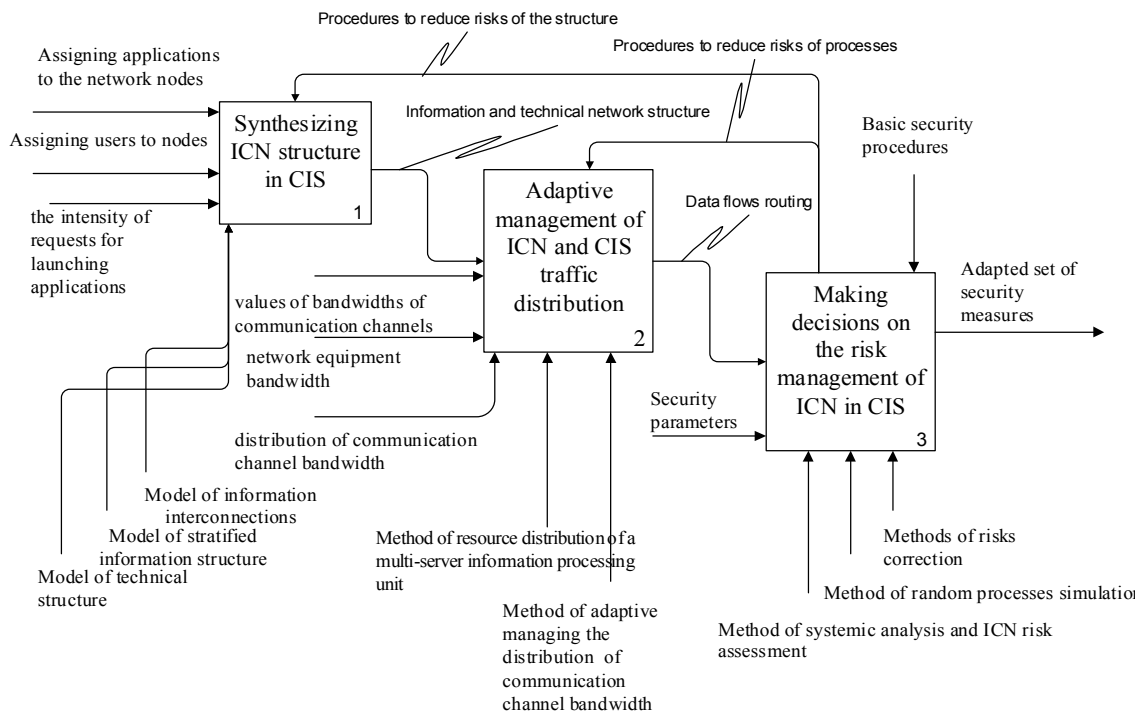


Fig. 1 The model of information technology of managing CIS ICN parameters

To enable the operation of the synthesizer of CIS ICN structure, the sequence of the following processes should be performed (Fig. 2):

- determining the composition of network users;
- determining the composition and parameters of application tasks being solved;
- determining the composition of complements that the network includes as well as requirements for the equipment necessary to implement the complements;
- developing the network information structure;
- analyzing the network information structure;
- determining quality indicators and criteria for solving application tasks;
- determining the composition of network parameters that are used in order to assess the network condition;
- determining the composition of network management parameters;

- determining the threshold of net parameters.

To enable the operation of the adaptive traffic control block, the sequence of the following processes should be performed while preparing and solving management tasks [12]:

- solving the task of network configuration;
- solving tasks of operating control;
- correcting tasks of network configuration and operating control.

Preparation stage is necessary in order to work out basic approaches and requirements for traffic management, on the basis of which the criteria of managing the quality are determined, specific goals and tasks of management are formulated.

The following parameters are considered as input data of information technology for solving tasks of analyzing data flows in the network, downloading communication channels and network equipment:

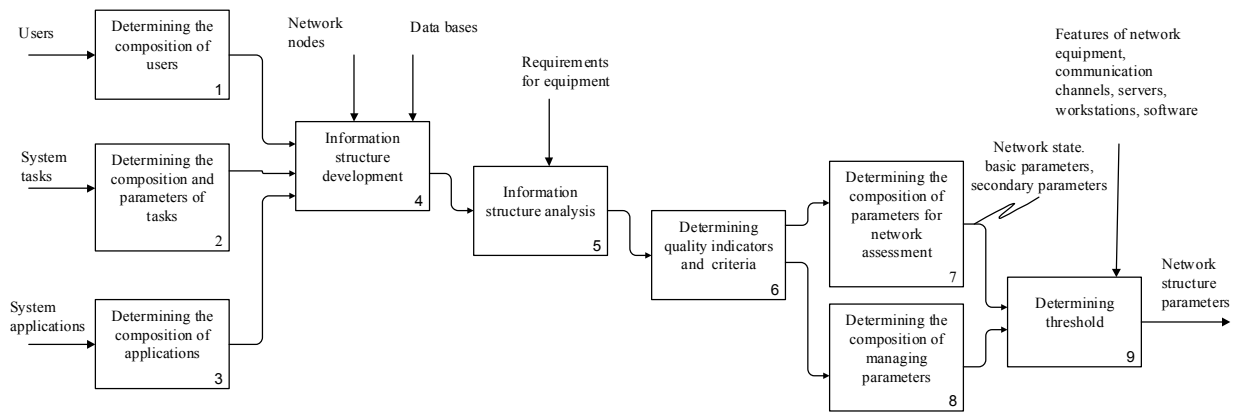


Fig. 2 The model of processes of the synthesizer of CIS ICN structure

- assigning applications to network nodes;
- assigning users to network nodes (workstations);
- the intensity of requests for running applications or tasks;
- network structuring, that assigns communication channels to network equipment and binding workstations and servers to network equipment;
- values of bandwidth of communication channels that are used in the network;
- the bandwidth capacity of the equipment used in the network;
- assigning the bandwidth of communication channels to particular tasks (sets of tasks);
- data flow routing in the network.

At the stage of network channel setting the following sub-processes are performed:

1. determining certain quality factors of network setting.
2. developing and calculating the parameters of data flows of hierarchical information structure of the network; solving the tasks of information structure development is considered as a partial solution of a setting task that result in determining the parameters of information structure and data flows for the information structure with these parameters.
3. determining the composition of network equipment; the equipment composition and its parameters – commutators, servers, client workstations, types of communication channels that are used – are determined according to the analysis of requirements for the equipment parameters, analysis of data flows, conducted for the information structure of network traffic management, possible number of network technical nodes and preprocessing data about network technical structure (a priori assigning users and nodes to sub-networks).

The development of network technical structure results in developing a number of values of basic network parameters as well as the structure of basic network, sub-networks and their composition are also designated. It should be noted that the tasks at this stage

can be solved repeatedly, if assigning system applications to the nodes of information structure is changed. After the stage has been finished, a set of values of network parameters is obtained.

2. Developing the information structure of a software and hardware complex

The structure synthesizer operation is considered regarding ICN for automated control system of technological processes (TP ACS) “Domestic solid waste recycling facility with the system of collection, utilization of landfill gas and production of electricity” as an example. This CIS is a multi-functional, distributed, free-programmed automated system that is designed for long-term continuous real-time operation, that comprises necessary functions of collecting, processing and presenting information as well as the functions of managing, controlling, protecting, blocking and signalling.

The software and hardware complex of top level and general station systems (S/HC of TL and GSS) is a constituent part of TP ACS. This complex is designed for automating the management of technological processes of general station and backup systems.

S/HC of TL and GSS is a three-level distributed systems that is designed hierarchically and conforms to technological structure and peculiarities of assembling the object of automation.

The first stage of developing ICN information structure is determining functional tasks of S/HC of TL and GSS, that are broken down into three types and arranged in Table 1.

These functions are assigned to the following levels:

- low level – functions of input / output of analog and discrete input information, logic of management and control, generation of analog and discrete output signals;
- medium level – functions of software downloading and control of lower level operation, database support, remote control of locking, control elements and mechanisms, data display on video terminals of operator and engineering stations, data recording and archiving;
- upper level – functions of data display on video terminals of the stations of management personnel.

Table 1
Functions of S/HC of TL and GSS

F. t.	Functions
Control	- remote control of locking and control elements and mechanisms; - technological protection; - protective and technological interlocking; - automatic control of technological parameters; - remote control of the electric part elements
Information	- collecting input information and checking its validity; - supplying information about TP and the operation of automatic devices; - warning and alarm signalling; - recording information, which is introduced and developed in S/HC; - recording deviations of parameters; - documenting the recorded information; - diagnosing hardware and software of the S/HC; - calculating operational, technical and economic indicators.
Helper	- correcting the parameters of setting systems of automatic control; - supplying information about the operation of real-time control algorithms; - simulating input information for CS testing; - input / output protection and locks; - automated processing and storing the results of metrological certification of measuring channels; - managing the operation of S / HC

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \lambda_{11} + \lambda_{46} & \lambda_{21} + \lambda_{26} & \lambda_{31} + \lambda_{36} & \lambda_{41} + \lambda_{46} & \lambda_{51} + \lambda_{56} & \lambda_{61} + \lambda_{66} & (\lambda_{71} + \dots + \lambda_{76}) & \lambda_{81} + (\lambda_{88} + \dots + \lambda_{8,24}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (\lambda_{72} + \dots + \lambda_{76}) & \lambda_{88} + (\lambda_{8,15} + \dots + \lambda_{8,18}) + \lambda_{8,23} \\ \lambda_{41} & \lambda_{21} & \lambda_{31} & \lambda_{41} & \lambda_{51} & \lambda_{61} & \lambda_{71} & \lambda_{81} + \lambda_{8,13} + \lambda_{8,22} + \lambda_{8,24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{89} + \lambda_{8,10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (\lambda_{72} + \dots + \lambda_{75}) & \lambda_{8,11} + \lambda_{8,19} + \lambda_{8,22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (\lambda_{8,16} + \dots + \lambda_{8,18}) + \lambda_{8,23} \end{pmatrix};$$

2) matrix of fulfilling tasks at the network nodes regarding system applications and coupling to databases is calculated:

$$Z = Z' + Z'' = G \times D + S \times D.$$

3) the intensity of users' requests to nodes considering system applications and tasks is calculated:

$$M = ((U \times P) \times G) \times H.$$

Thus, the following parameters of information structure are obtained: the intensity of system applications, a number of tasks fulfilled at the network nodes, the intensity of requests to the nodes.

Conclusions

Information technology of managing the parameters of CIS ICN is suggested; three blocks operate successively in the context of this technology. The model of processes of information technology is developed. The sequence of processes executed in each block is analyzed. Information technology enables automating solution of the following tasks:

- the network structure regarding application tasks of CIS is developed;

The elements of information model of the network structure are determined according to the structural diagram of ACS of TP: a set of network main users: U_{1-8} , a set of tasks that are performed by users: S_{1-24} , a set of system complements of the network: p_{1-6} , a set of system data bank: d_{1-10} . Matrices of coupling the tasks of ACS of TP to other elements of ICN are developed according to the model of information structure:

- matrix of coupling "user - assignment" with relevant intensity of requests (Λ);
- matrix of coupling "assignment - system complements" (P);
- matrix of coupling "assignment - database" (D),
- matrix of coupling "assignment - users" (U).

Network nodes are placed on five levels according to the structural diagram of TP ACS.

Matrices of coupling the nodes of TP ACS with other ICN elements are developed in order to analyze the load of ICN nodes: matrix of assigning system applications to network nodes (G), matrix of assigning users to network nodes (H), matrix of data coupling to databases (S). The intensities of request flows among the elements of information structure can be calculated on the basis of these data:

1) matrix of intensity of system applications performed by users is calculated:

$$\Gamma = P \times \Lambda.$$

- software and hardware components are distinguished within the structure;
- data flows that are transmitted along the network are researched;
- the network features are calculated.

The requirements for the technical structure of the network are determined according to the obtained parameters of the technical structure.

Information technology that enables adaptive management of its parameters by means of solving tasks of network configuration is developed. Assessing and managing risks at the stages of structural and parametric synthesis and network traffic distribution are suggested as well.

The operation of synthesizer of ICN information structure is analyzed considering software and hardware complex included into a TP automated control system as an example. Matrices of coupling elements of network information structure are developed. Matrices of intensity of data flows among these elements are calculated on the basis of network information structure. The obtained results constitute grounds for the operation of IT second block - adaptive managing the network traffic distribution.

References

1. Бірюков Д. С. *Захист критичної інфраструктури: проблеми та перспективи впровадження в Україні* / Д. С. Бірюков, С. І. Кондратов. – К. : НІСД, 2012. – 96 с.
2. Лаврут О.О. Дослідження якості управління потоками інформації у телекомунікаційній системі критичного призначення // Системи озброєння і військова техніка, 2014, № 4(40) – С.89-93.
3. Степанов С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. - Эко-Трендз, 2010 – 391с.
4. Основные стандарты сетей передачи данных [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.gpntb.ru/win/book/5/Doc11.HTML>
5. Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем: Сб. науч. тр. / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М. МИЭМ. – 2006. – 302с.
6. Агеев, Д.В. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев, А.А. Игнатенко, А.Н. Копылев // «Проблемы телекоммуникаций», 2011, № 3 (5). – С. 18 – 37. Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_ageyev_method.pdf.
7. Sen, G. Exact approaches for static data segment allocation problem in an information network [Text] / G. Sen, M. Krishnamoorthy, N. Rangaraj, V. Narayanan // Computers & Operations Research. – 2015. – Vol. 62. – P. 282–295.
8. You, L. Cross-layer optimization of wireless multihop networks with one-hop two-way network coding [Text] / L. You, L. Ding, P. Wu, Z. Pan, H. Hu, M. Song, J. Song // Computer Networks. – 2011. – Vol. 55, Issue 8. – P. 1747–1769.
9. Xi, N. Secure service composition with information flow control in service clouds [Text] / N. Xi, C. Sun, J. Ma, Y. Shen // Future Generation Computer Systems. – 2015. – Vol. 49. – P. 142–148.
10. Гончар С.Ф. Шляхи удосконалення державної політики забезпечення інформаційної безпеки критичної інфраструктури України: матеріали круглого столу “Державне реагування на загрози національним інтересам України: актуальні проблеми та шляхи їх розв’язання”, 19 лютого 2014 р., Київ, НАДУ при Президентові України (кафедра національної безпеки). – 2014. – С. 92–95.
11. Боярчук А.В. Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы анализа и обеспечения / А.В. Боярчук; под ред. В.С. Харченко. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2011. – 641с.
12. Кучук Г.А. Методика синтезу інформаційної технології управління мережевим трафіком / Г.А. Кучук, В.В. Косенко, О.П. Давікоза, С.А. Калкаманов // Системи управління, навігації та зв'язку, 2013, випуск 2(26) – С.138-143.

Надійшла до редколегії 10.07.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Рубан, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ В СИСТЕМАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

В.В. Косенко

Предметом дослідження в статті є проблема забезпеченні вимог щодо оперативності та обміну інформацією з високим рівнем інформаційної безпеки в системах критичної інфраструктури. **Мета** роботи – розробка інформаційної технології формування структури мережі, визначення її параметрів, управління розподілом мережевого трафіку, орієнтованих на вирішення заданого набору прикладних завдань і забезпечення необхідної безпеки системи критичної інфраструктури в середовищі інфокомунікаційної мережі. Отримано наступні **результати**: Запропоновано структуру інформаційної технології, що містить три основних блока. Розглянуто послідовність процесів в кожному блоці. Розроблено модель роботи блоку формування структури інфокомунікаційної мережі. Розглянуто роботу блока синтезу інформаційної структури мережі на прикладі програмно-технічного комплексу у складі автоматизованої системи управління технологічними процесами. **Висновки**: За допомогою запропонованої інформаційної технології можна вирішити такі завдання: у відповідності з отриманими параметрами інформаційної структури визначити вимоги до технічної структури мережі; забезпечити адаптивність управління параметрами потоків даних шляхом налаштування мережі до змінних умов функціонування системи критичної інфраструктури; оцінювати та управляти ризиками на етапах структурно-параметричного синтезу та розподілу трафіка мережі.

Ключові слова: інформаційна технологія, система критичної інфраструктури, інфокомунікаційна мережа, адаптивне управління, модель процесів, інтенсивність потоку даних.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ
ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ В СИСТЕМАХ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В.В. Косенко

Предмет исследования в статье – проблема обеспечения требований по оперативности обмена информацией с высоким уровнем информационной безопасности в системах критической инфраструктуры. **Цель работы** - разработка информационной технологии формирования структуры сети, определение ее параметров, управление распределением сетевого трафика, ориентированных на решение заданного набора прикладных задач и обеспечение необходимой безопасности системы критической инфраструктуры в среде инфокоммуникационной сети. **Получены следующие результаты**: Предложена структура информационной технологии, она содержит три основных блока. Рассмотрена последовательность процессов в каждом блоке. Разработана модель работы блока формирования структуры инфокоммуникационной сети. Рассмотрена работа блока синтеза информационной структуры сети на примере программно-технического комплекса в составе автоматизированной системы управления технологическими процессами. **Выводы**: С помощью предложенной информационной технологии можно решить следующие задачи: в соответствии с полученными параметрами информационной структуры определить требования к технической структуре сети; обеспечить адаптивность управления параметрами потоков данных путем настройки сети к изменяющимся условиям функционирования системы критической инфраструктуры; оценивать и управлять рисками на этапах структурно-параметрического синтеза и распределения трафика сети.

Ключевые слова: информационная технология, система критической инфраструктуры, инфокоммуникационных сеть, адаптивное управление, модель процессов, интенсивность потока данных.

УДК 681.51:623.592

А.С. Могілатенко¹, Д.М. Обідін², О.П. Кондратенко³, П.Г. Берднік⁴¹ Військова частина А0593² Кіровоградська льотна академія НАУ, Кропивницький³ Національна академія Національної гвардії України, Харків⁴ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМ ПОТОКОМ ПОВІДОМЛЕНЬ ПРО ПОВІТРЯНІ ОБ'ЄКТИ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ ЦЕНТРІВ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

Необхідною умовою рішення задач управління в регіональному центрі управління повітряним рухом являється наявність радіолокаційної інформації про повітряні об'єкти. Забезпечення радіолокаційною інформацією регіонального центру управління повітряним рухом являється однією з функцій автоматизованої системи управління регіонального центру управління повітряним рухом і являє собою сукупність взаємопов'язаних заходів по виявленню, збору, обробці, аналізу і видачі даних про повітряні об'єкти від джерел радіолокаційної інформації на регіональному центрі управління повітряним рухом.

Ключові слова: аналіз, метод, управління повітряним рухом.

Вступ

Адаптивний підхід передбачає функціонування системи в умовах апріорної невизначеності і забезпечує пристосування до непередбачених змін властивостей об'єкта управління та зовнішнього середовища [1]. Під адаптацією розуміють процес цілеспрямованої зміни параметрів, структури або

властивостей системи на підставі інформації, отриманої в процесі виконання основних функцій з метою необхідного функціонування системи при умовах, що змінюються [2].

Структурна схема адаптивної системи [2] зображена на рис. 1 і є замкнутим контуром, що включає в себе: об'єкт управління, пристрій ідентифікації, пристрій, що вирішує і пристрій управління.

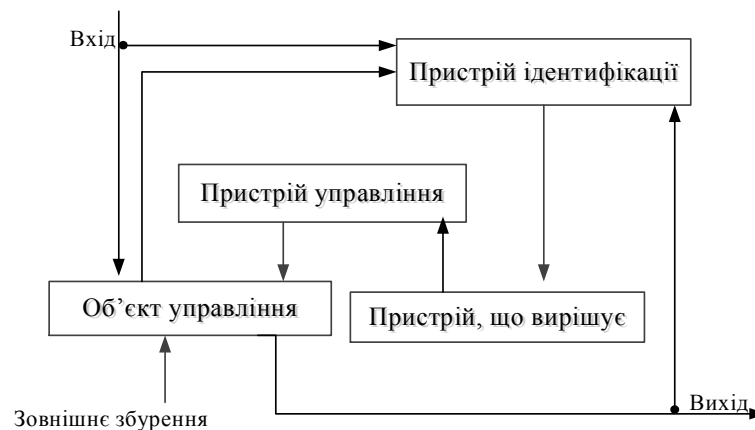


Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи

Аналіз існуючих методів

У відповідності зі схемою на рис. 1 адаптивні системи управління передбачають виконання трьох процедур [1 - 4]:

1) визначення динамічних характеристик середовища та об'єкта управління в процесі функціонування (пристрій ідентифікації);

2) оцінювання стану об'єкта управління (пристрій, що вирішує);

3) формування керуючих сигналів на основі інформації, отриманої за допомогою перших двох процедур (пристрій управління).

Визначимо аналогічні структурні елементи для адаптивної підсистеми забезпечення радіолокаційної інформацією (РЛІ) регіонального центру управління повітряним рухом.

Об'єктом управління в цьому випадку є потік повідомлень про повітряні об'єкти (ПО) від джерела радіолокаційної інформації, а зовнішнім збуренням

відповідає придушення елементів автоматизованої системи управління (АСУ) регіонального центру управління повітряним рухом (ЦУПР). При цьому можна виділити основні задачі адаптивного управління, що відповідають вищевказаним процедурам:

1) задача розпізнавання ситуацій застосування методів стиснення і видачі повідомлень про ПО для інформаційного потоку РЛІ;

2) задача розподілу методів стиснення і видачі РЛІ за повідомленнями про ПО;

3) завдання безпосередньої зміни структури повідомлень про ПО.

Для вирішення першої і другої задачі необхідно розробити вирішальні правила, а для вирішення третьої задачі – протокол формування та обробки повідомлень про ПО зі змінною структурою. При цьому вирішальні правила, згідно з певними принципами, повинні розроблятися з використанням інтелектуальних інформаційних технологій. Однією з основних задач застосування інтелектуальних інформаційних технологій є уявлення знань про досліджувану предметну область. Під поданням знань розуміється сукупність методів, способів форм і моделей структурування відображення і формалізації знань [5]. Проведемо аналіз відомих методів представлення знань про задачі управління

Логічні методи представлення знань [6-8]. Ці методи, дозволяють уявити знання у вигляді теорем, що передбачає визначення посилок (безліч відомих істинних тверджень), що дозволяють сформулювати теорему. Доказ теореми дозволяє отримати рішення вихідної задачі. Відсутність суворої процедури підбору аксіом для логічного висновку; і можливість не отримати результату рішення за обмежений час обмежують застосування логічних методів для подання знань про завдання формування і видачі повідомлень про ПО.

Методи представлення знань, засновані на мережах Петрі [9, 10]. Дані методи дозволяють детально і наочно описувати паралельні обчислювальні процеси, тому їх застосування доцільно при розробці обчислювальних систем і моделей для тестування інтелектуальних систем. Однак вони не придатні для представлення знань про задачі формування і видачі повідомлень про ПО.

Нейромережеві методи представлення знань [11, 12]. Дані методи є універсальними, тому можуть застосовуватися для подання знань про задачі будь-якої предметної області. Однак це вимагає значних часових і обчислювальних витрат, що не дозволить організувати видачу повідомлень про ПО без затримок. Крім того, нейромережеве уявлення є громіздким і важко модифікується.

Методи представлення знань, на основі логіки категорій [13]. Згідно з положеннями теорії категорій, для розв'язання методу необхідно встановити

всі можливі відносини (морфізми) між об'єктами, що в умовах жорстких часових рамок ухвалення рішення і невизначеності вихідної інформації є неможливим. Тому використання логіки категорій не припустимо для представлення знань про задачі формування і видачі повідомлень про ПО.

Методи представлення знань на основі фреймів [8, 13, 14]. Перевагою даних методів являється наочність і природність опису різноманітних ситуацій. Разом з тим, фрейм являється множиною описів (слотів), які знаходяться в певних взаємних відношеннях, а слоти зв'язані з процедурами, які передають управління один одному за допомогою обміну повідомленнями, що знижує можливості адаптації при управлінні інформаційним потоком повідомлень про ПО.

Методи представлення знань у вигляді продукцій [8, 13, 14]. Продукції являють собою правила виду «Якщо А то В», що обумовлює їх універсальність, застосовність до широкого кола задач; модульності організації знань і декларативність їх подання.

За допомогою продукцій зручно описувати умови застосування керуючих впливів, що дозволяє використовувати продукції для представлення вирішальних правил застосування окремих методів стиснення повідомлень і управління дискретністю їх видачі. Однак оперативність виведення рішення в системі продукцій різко знижується зі збільшенням правил, що може призвести до затримки повідомлень про ПО при їх видачі.

Мережеві методи представлення знань [15]. Мережеве подання знань просте і зрозуміле для сприйняття через опис та обробку знань в термінах предметної області, звичних для людини. При цьому є можливість контролю коректності знань і забезпечується кінцевість процедури логічного висновку. Однак представлення окремих задач адаптивного управління за допомогою мережі буде громіздким через численні умови застосування методів стиснення і видачі повідомлень про ПО, що знижує оперативність виведення рішення.

Таким чином, аналіз існуючих методів представлення знань показав, що жоден з них не відповідає вимогам щодо забезпечення подання знань про процес формування та видачі повідомлень про ПО в АСУ регіонального ЦУПР. Тому виникає необхідність додаткових досліджень, причому мережеві та продукційні методи представлення знань можуть бути взяті за основу при розробці методу формалізації задач формування і видачі повідомлень про ПО в АСУ регіонального ЦУПР.

Постановка задачі досліджень

Аналіз змісту і особливостей забезпечення РЛІ регіонального ЦУПР в сучасних умовах показав, що використання існуючих методів узгодження продук-

тивності джерел РЛІ з пропускною спроможністю каналів передачі даних (ПД) у випадках їх перевантажень може привести до протиріччя між необхідною і реалізованою точністю і повнотою забезпечення РЛІ регіонального ЦУПР. Вирішення даного протиріччя направлене на забезпечення регіонального ЦУПР необхідною РЛІ для оцінки повітряної обстановки. Організація такого забезпечення є важливим практичним завданням підсистеми інформаційного забезпечення АСУ [16].

Рішення даної задачі можливе за допомогою спеціального методу формування та видачі повідомлень про ПО, що дозволяє адаптувати розмір і дискретність видачі повідомлень про ПО до змін продуктивності джерел РЛІ і пропускної здатності каналів ПД. Розробка такого методу є важливим науковим завданням при розробці математичного та програмного забезпечення перспективних АСУ регіонального ЦУПР.

У ряді робіт викладені сучасні підходи до вирішення окремих задач інформаційного забезпечення в АСУ регіонального ЦУПР:

використання змінної структури повідомлень про ПО [17, 18];

стиснення телеметричної інформації [19-21];

визначення важливості (ступеня небезпеки) ПО;

принципи управління інформаційним потоком в системі ПД [1-4];

використання інтелектуальних інформаційних технологій для формалізації задач управління динамічними системами.

Разом з тим, запропоновані в даних роботах рішення не враховують особливості забезпечення РЛІ регіонального ЦУПР, пов'язані з різною змістовою інтерпретацією інформаційних елементів в повідомленнях про ПО, помилками оцінювання координатної інформації та різними вимогами до якості РЛІ про ПО залежно від етапу дій за ними. Тому питання формування і видачі повідомлень про ПО від джерел РЛІ на АСУ регіонального ЦУПР вимагають подальших досліджень, чому і присвячена дана робота.

Завдання досліджень обмежимо вирішенням наступних окремих задач:

1) розробка методів стиснення повідомлень ПО і управління дискретністю їх видачі від джерел РЛІ на АСУ регіонального ЦУПР;

2) розробка методу управління інформаційним потоком повідомлень про ПО від джерел РЛІ в АСУ регіонального ЦУПР з використанням інтелектуальних інформаційних технологій;

3) оцінка ефективності використання розробленого методу формування та видачі повідомлень про ПО і пропозиції по його застосуванню в АСУ регіонального ЦУПР. Розроблена група методів повинна

забезпечити необхідні значення показників повноти і точності забезпечення РЛІ АСУ регіонального ЦУПР.

Висновки

1. Аналіз змісту процесу забезпечення РЛІ регіонального ЦУПР показав, що в умовах інтенсивного придушення елементів АСУ регіонального ЦУПР може привести до перевищення необхідної продуктивності джерел РЛІ на 50% над пропускною спроможністю каналів ПД.

2. Застосування існуючих методів збільшення або відновлення пропускної здатності каналів ПД (виділення додаткових і використання запасних каналів ПД, а також маршрутизація повідомлень) може виявитися практично неможливим, зважаючи на інтенсивне придушення системи ПД. Застосування існуючих методів зменшення продуктивності джерел РЛІ (групування (укрупнення) ПО; селекція (відбір) ПО для їх видачі; збільшення дискретності видачі РЛІ для всіх ПО; стиснення даних) знижують повноту і точність забезпечення РЛІ регіонального ЦУПР.

3. Оцінка повноти і точності забезпечення РЛІ регіонального ЦУПР показала, що при використанні існуючих методів зменшення продуктивності джерел РЛІ не забезпечуються необхідні значення показника повноти (коефіцієнта провідки трас $K_{пр} \geq 0,88$) і точності (с.к.п. координатної РЛІ $\sigma \leq 1000$ м.) з причин фіксованої структури повідомлень про ПО і дискретності їх видачі в АСУ регіонального ЦУПР.

4. Використання міжнародного протоколу обміну РЛІ ASTERIX зі змінною структурою повідомлень про ПО дозволяє зменшити продуктивність джерела РЛІ за рахунок стиснення інформаційних елементів. Однак існуючі методи стиснення не враховують неоднорідність семантичної інтерпретації інформаційних елементів в повідомленнях і помилки координат ПО, що не забезпечує потрібного стиснення повідомлень про ПО. Це обумовлює необхідність додаткових досліджень в області стиснення даних.

Аналіз вимог до якості РЛІ про ПО показав, що забезпечити обґрунтоване управління дискретністю видачі повідомлень про ПО можна на основі спільної оцінки важливості РЛІ для споживача, підльотного часу ПО до встановлених рубежів і необхідної точності РЛІ. Це обумовлює необхідність додаткових досліджень по оцінці важливості РЛІ для споживача і її спільного обліку з зазначеними факторами.

5. Для обґрунтованої оцінки параметрів повітряної обстановки і вибору відповідних методів стиснення і видачі повідомлень з використанням знань про досліджувану предметну область, що враховують досвід фахівців, доцільно використовувати

адаптивний підхід до управління інформаційним потоком РЛІ на основі інтелектуальних інформаційних технологій. Аналіз існуючих методів представлення знань показав, що жоден з них не відповідає вимогам щодо забезпечення подання знань про задачі формування і видачі повідомлень про ПО в АСУ регіонального ЦУПР, що обумовлює необхідність додаткових досліджень.

6. Протиріччя між необхідною і повнотою, що реалізується, і точністю забезпечення РЛІ регіонального ЦУПР і недостатня розвиненість теоретичної бази для його вирішення обумовлюють необхідність проведення подальших досліджень відповідно до напрямків, викладених в постановці задачі.

Список літератури

1. Буков В.М. Адаптивні прогнозуючі системи управління польотом / В.М. Буков. – М.: Наука, 1987. – 232 с.
2. Советов Б.Я., Стах В.М. Побудова адаптивних систем передачі інформації для автоматизованого управління. - Л.: Енергоіздат., 1982. - 120 с.
3. Кунцевич В.М. Адаптивне управління: алгоритми, системи, використання. - К.: Вища школа, 1988. - 64 с.
4. Куропаткін П.В. Оптимальні і адаптивні системи: Навчальний посібник для вузів. - М.: Вища школа, 1980. – 287 с.
5. ДСТУ 2481-94. Системи оброблення інформації. Інтелектуальні інформаційні технології. Терміни та визначення. - ІС: Держстандарт України, 1994. - 15 с
6. Вагін В.М. Дедукція і узагальнення в системах прийняття рішень. - М.: Наука. 1988. - 384 с.
7. Чень Ч., Лі Р. Математична логіка і автоматичний доказ теорем: Пер. з англ.- М.: Наука, 1983. - 360 с.
8. Поспелов Д.А. Ситуаційне управління. Теорія і практика. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
9. Васильєв В.В., Кузьмук В.В. Мережі Петрі, паралельні моделі і алгоритми мультипроцесорних систем. – К.: Наукова думка. 1990. – 216 с
10. Пітерсон Д. Теорія мережей Петрі і моделювання систем / Д. Пітерсон. – М.: Наука. 1988. – 263 с.
11. Круглов В.В., Борисов В.В. Штучні нейронні мережі Теорія і практика. – М.: Гаряча лінія - Телеком. 2001. – 381 с.
12. Борисов В.В. Основи побудови нейронних мереж / В.В. Борисов, В.В. Круглов, Є.В. Харитонов. – Смоленськ: ВУ ППО ВС РФ. 1999. – 297 с.
13. Теоретичні основи автоматизації процесів вироблення рішень в системах управління / В.Е. Ярушек та ін. – Х.: ХВУ, 1993. – 446 с.
14. Нільсон Н. Принципи штучного інтелекту. – М.: Радіо і зв'язок. 1985. – 373 с.
15. Ярушек В.Є. Про формалізовану модель для планування дій керованих об'єктів в динамічному середовищі // Проблеми біоніки. Вип. 29. – Х.: Вища школа, 1982. - С. 88-95.
16. Глебов Ю.В., Абрамов В.А. Автоматизація бойового управління у військах ППО. - Х.: ВІРТА ППО, 1988. - 230 с.
17. Eurocontrol standard document for radar dataexchange, Part 1 - All Purpose Structure- Eurocontrol Radar Information Exchange (ASTERIX), (Ref: SUR.ETI .STD05.2000 - STD-01-01), November 1997, 59 p.
18. Дж. Ірвін, Д. Харль. Передача даних в мережах: інженерний підхід: переклад з англ. - СПб.: БХВ - Петербург, 2003. - 448 с.
19. Амел'кін В.А. Методи нумераційного кодування. - Новосибірськ: Наука, 1986. - 158 с.
20. Колесник Ю.В., Литвин А.І., Підгорний О.В. Стиснення повідомлень за допомогою методу кодування довжин серій // Електронне моделювання. – 1995. – Т. 17, № 2. – С. 90-92.
21. Ольховський Ю.Б. Стиснення даних при телевимірах / Ю.Б. Ольховський, О.М. Новосьолов, А.П. Мановцев. Под ред. В.В. Чернова. – М.: Рад. радіо, 1971. – 304 с.

Надійшла до редколегії 31.10.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Тимочко, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ СООБЩЕНИЙ О ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТАХ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

А.С. Могилатенко, Д.Н. Обидин, О.П. Кондратенко, П.Г. Бердник

Необходимым условием решения задач управления в региональном центре управления воздушным движением является наличие радиолокационной информации о воздушных объектах. Обеспечение радиолокационной информацией регионального центра управления воздушным движением является одной из функций автоматизированной системы управления регионального центра управления воздушным движением и представляет собой совокупность взаимосвязанных мероприятий по выявлению, сбору, обработке, анализу и выдаче данных о воздушных объектах от источников радиолокационной информации на региональном центре управления воздушным движением.

Ключевые слова: анализ, метод, управление, управление воздушным движением.

ANALYSIS METHODS FORMALIZATION OF THE PROCESS INFORMATION MANAGEMENT REPORTING OF AIR OBJECTS IN THE AUTOMATED SYSTEM OF REGIONAL AIR TRAFFIC CONTROL CENTER. PROBLEM RESEARCH

A.S. Mohilatenko, D.N. Obidin, O.P. Kondratenko, P.G. Berdник

A necessary condition for control tasks in the regional air traffic control center is the availability of radar information on air facilities. Providing radar information of the regional air traffic control center is one of the functions of the automated control system of regional air traffic control center and is a set of interrelated measures for the identification, collection, processing, analysis and delivery of data on air targets from radar data sources at the regional air traffic control center.

Keywords: analysis, method, management, air traffic control.

UDC 004.89:378.4

O.I. Morozova

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF A FORMAL REPRESENTATION OF MULTIFORM PROCESSES IN THE SYSTEMS OF TRAINING, EDUCATION AND PRODUCTION

The paper proposes a technology for formalizing multiform processes in the systems of training, education and production. One of the important components of the formalization technology is the construction of models of objects of the topical area. The formalization technology being developed consists of three main formalization branches: logical methods of knowledge modeling, heuristic methods and ontological methods. One of the stages of formalization technology is the modeling of processes and phenomena on the basis of a mathematical apparatus. The mathematical interpretation of combining models of related topical area is shown.

Keywords: *formalization technology, educational processes, topical area, school, college, production, integrated environment.*

Introduction

The networked educational technologies based on integrated intelligence exist and develop, and for them it is necessary to develop mathematical support. For this purpose, it is proposed to use formalization technology, which differs from the existing in the work [1]. The procedures and methods of ontological modeling [2], heuristic and logistical methods are used in constructing formalization technology.

Based on the use of formal procedures of developing technology the cognitive modelling in gaming learning methods [3] was implemented. A new approach was proposed, ensuring the pupils' conscious choice of the future profession. It lies in organizing on the pages of the profiling departments sites [4] of game models and their implementation in the form of quizzes. The proposed technology for formalizing representation of the integration of schools, colleges and production will allow to structure the models that are applicable in these three systems.

In addition, using a college model of knowledge formed through the training and work programs based on knowledge and skills, a particular enterprise could independently create a mini-curriculum and train specialists for its field on these plans in a remote mode. It can be a bachelor or a master, who has a system of professional knowledge, skills and habits. Also, employers and human resources managers could trace the process of system formation of the professional knowledge among students from the second to the fifth year [5].

1. Mathematical interpretation of combining models of related topical areas

The work suggests the formation of core (C) of related topical areas (TA), which will be interpreted by the models of the process inherent in each area. In Fig. 1

the mathematical interpretation of combining models of related topical areas is shown. The first procedure will unite the subject area "School-College", and the second procedure is "College-Production". The construction of related core is confirmed by the realized processes of uniting schools and colleges in the network of websites [3-4] and linking the network of college sites with employers [5].

Here is a generalized scheme of formalization technology. The first stage of the formalization technology being developed the representation of the integration of the school, college and production is the structural and functional analysis of formalized processes, namely the finding of their features, the definition of objects and their types that must to be formalized and the models for them must be constructed. Thus, one of the important components of the technology of formalization is the construction of models of objects of the topical areas. In comparison with the formalization technology proposed in the work [1], the feature of the technology for formalizing the multiform processes in the systems of training, education and production ("School-College-Production") is the use of ontological modeling, since not all processes and phenomena can be represented in the educational system by heuristic and logical methods. The created models of objects of the topical area provide knowledge representation by heuristic, logical and ontological methods as well. In the first case, their components serve to specify the corresponding heuristics in the models of knowledge representation, in the second, their symbols form the alphabet of one of the formal systems (propositional calculus, predicates, formal theories, etc.), and in the third case their components serve to structure and construct connections between the objects under consideration [6].

Consequently, the formalization technology being developed consists of three main formalization branches.

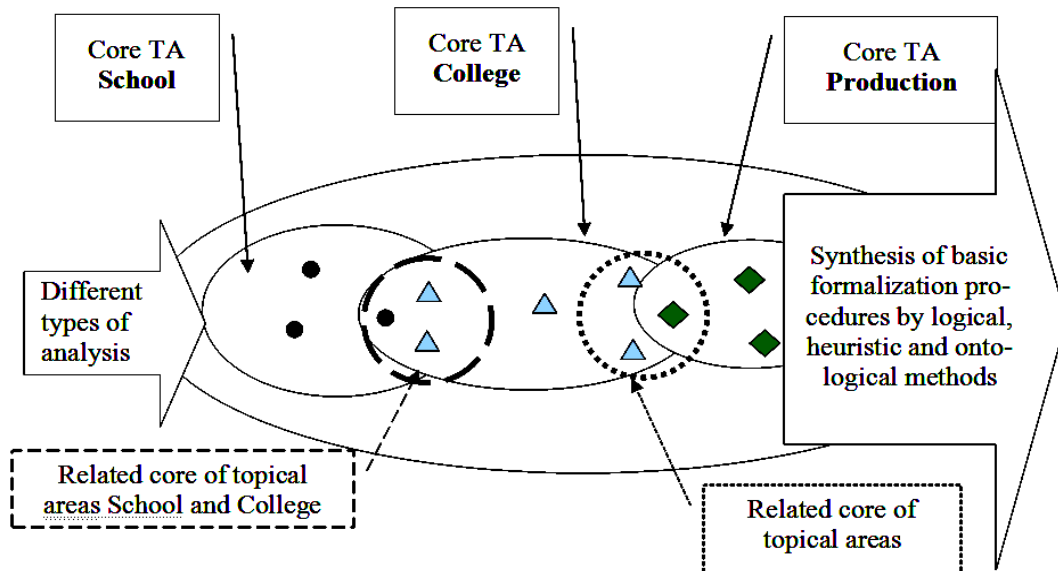


Fig. 1. Mathematical interpretation of combining models of related topical areas

The first branch of formalization technology is the logical methods of knowledge modeling, which are based on formal systems. The second branch consists of heuristic methods, which are based on the representation of knowledge by production systems, semantic networks, frames and other heuristics. The third branch of formalization technology is made up of ontological methods, which are used to structure knowledge about the objects of the investigated area. The use of ontological methods makes it possible to cope with such a difficult task of coordinating conceptual descriptions of information and intellectual resources that are compiled by different specialists. Features of ontological methods are objectivity, universality and integrity [7].

Generalized structure of the main components of the formal representation of knowledge in support of information technology solutions is shown in Fig. 2.

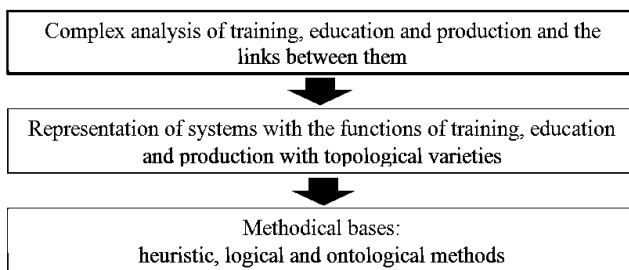


Fig. 2. Generalized structure of the main components of the formal representation of knowledge in support of information technology solutions

2. Technology of formalization of the integrated environment "School-College-Production"

The next step in the technology of formalization is the modeling of processes and phenomena on the basis of a mathematical apparatus. In this case, the methods of topology (the theory of categories and functors) are

most suitable. The goal of this stage is to create a meta-model that will unite all three formalization branches, in other words, procedures for constructing models of topical areas. As part of the topical area, the core is allocated, which is determined by the research objective and includes some of the most essential for this study of the TA objects and the many links between them. Under the TA in the formalization of the representation of the integration of the school, college and production, one should understand the training, educational and production processes and their state, which is described by the totality of the properties of the constituent objects and the connections between them. The structure of the technology for formalizing the representation of the integration of the school, college and production is presented in the form of a scheme in Fig. 3.

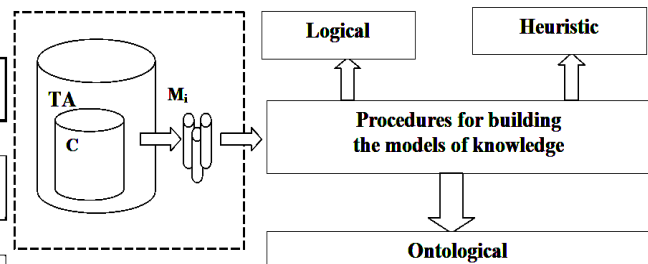


Fig. 3. The generalized scheme of formalization technology of the integrated environment "School-College-Production"

It shows the selection from the topical area of its core (C), consisting of individual models

$$M_i, i = 1..N,$$

which can be represented by heuristic, logical and ontological methods using appropriate procedures. In the process of realizing the technology of formalization, it is proposed to use a methodological base, the hierarchy of which is shown in Fig. 4.

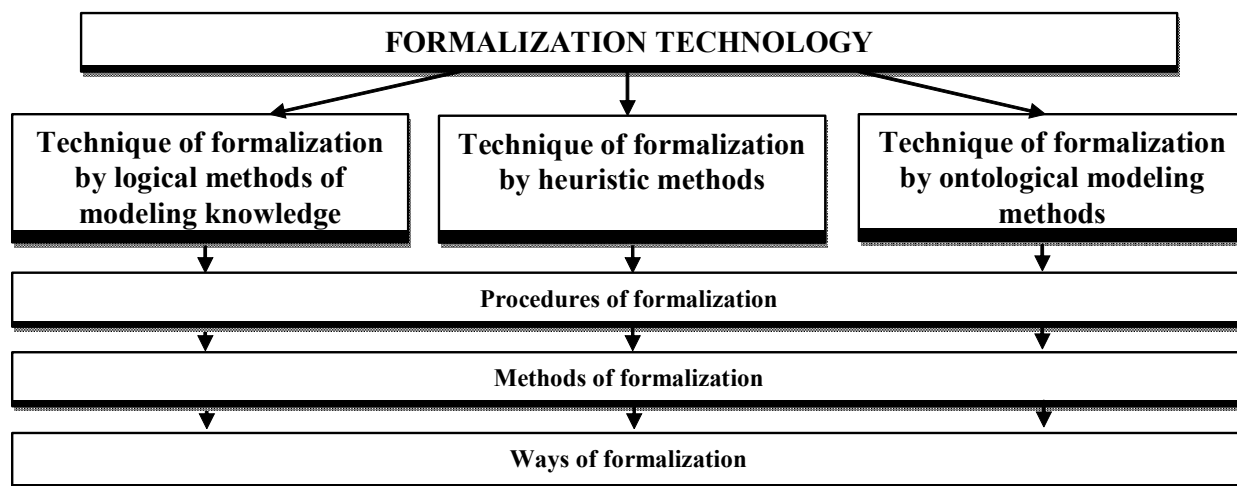


Fig. 4. Hierarchy of methodological basis of formalization technology

Conclusion

In the work, a formalization technology was proposed. One of the techniques in this technology is ontological modeling, which is used to structure knowledge about investigated area objects and coordination of conceptual descriptions of information and intellectual resources. In addition, a mathematical interpretation of combining models of related topical areas is shown.

References

1. Meteshkin, K.A. *Cybernetic pedagogy: theoretical bases of education management on the basis of integrated intelligence*. ISU Publ., 2004. 400 p.
2. Meteshkin, K.A., Morozova, O.I., Fedorchenko, L.A., Khayrova, N.F. *Cybernetical Pedagogy: Ontological Engineering in Training and Education*. National University of Urban Economy in Kharkiv Publ., 2012. 207 p.
3. Meteshkin, K.A., Morozova, O.I., Kochura, L.A. *Cognitive modeling in gaming methods of teaching*. *Radio-technical and computer systems*, 2016, No. 3 (77), pp. 41-48.

4. *The site of the department of geoinformation systems, land and real estate evaluation* [Electronic resource]. – Available at: <http://www.kaf-gis.kh.ua/home> (accessed 04/09/2017).

5. *The product of our work (knowledge, skills, skills)* [Electronic resource]. – Available at: <http://kaf-gis.kh.ua/produkt-nashev-raboty-znaniya-umeniya-navyki> (accessed 04/09/2017).

6. Mordvinov, V.A. *Ontology of modeling and designing of semantic information systems and portals: reference book*, MIREA, 2005. 237 p.

7. Mukhacheva, N.N., Popov D.V. *Ontological models and methods for managing information and intellectual resources of the organization*. *Bulletin of the USATU*, 2010, No. 1 (36), pp. 123-135.

Надійшла до редколегії 11.08.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Рудницький, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ РІЗНОМАНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ НАВЧАННЯ, ОСВІТИ І ВИРОБНИЦТВА

О.І. Морозова

В роботі запропонована технологія формалізації різноманітних процесів в системах навчання, освіти і виробництва. Однією з важливих складових технології формалізації є побудова моделей об'єктів предметної області. Технологія формалізації, що розробляється в роботі, складається з трьох основних гілок формалізації: логічні методи моделювання знань, евристичні методи і онтологічні методи. Одним з етапів технології формалізації є моделювання процесів і явищ на основі математичного апарату. Показана математична інтерпретація об'єднання моделей суміжних предметних областей.

Ключові слова: технологія формалізації, освітні процеси, предметна область, школа, вищий навчальний заклад, виробництво, інтегроване середовище.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МНОГООБРАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОБУЧЕНИЯ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

О.И. Морозова

В работе предложена технология формализации многообразных процессов в системах обучения, образования и производства. Одной из важных составляющих технологии формализации является построение моделей объектов предметной области. Разрабатываемая технология формализации состоит из трех основных ветвей формализации: логические методы моделирования знаний, эвристические методы и онтологические методы. Одним из этапов технологии формализации является моделирование процессов и явлений на основе математического аппарата. Показана математическая интерпретация объединения моделей смежных предметных областей.

Ключевые слова: технология формализации, образовательные процессы, предметная область, школа, высшее учебное заведение, производство, интегрированная среда.

УДК 004.89

Яшар Рахими

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

ЗНАНИЕОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ПОЛНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТАВОК СУХОФРУКТОВ В УКРАИНУ

Проанализированы проблемы, связанные с повышением эффективности функционирования существующей логистической цепи поставок сухофруктов (ЦПС) на рынок Украины из различных регионов мира. Показано, что главной проблемой в обеспечении успешного функционирования ЦПС являются различные виды неопределенности, имеющей место при формировании и принятии решений участниками ЦПС. Предложено модернизировать математическое и информационное обеспечение ЦПС путем дополнения применяемой в настоящее время среды моделирования AnyLogic средствами искусственного интеллекта и инженерии знаний. В качестве такого средства предложено использовать технологию мультиагентных систем (МАС). Применение технологии МАС обеспечит возможность адекватного представления в среде AnyLogic динамики функционирования ЦПС с учетом большого числа разнородных, изменяющихся во времени факторов, которые непосредственным образом влияют на эффективность функционирования ЦПС.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, поставки сухофруктов, логистическая система, цепи поставок, моделирование бизнес процессов, искусственный интеллект, инженерия знаний, интеллектуальный агент.

Введение

Цепь поставок сухофруктов в Украину (ЦПС) представляет собой сложную социо-экономическую систему, состоящую из множества поставщиков сырья (свежих фруктов), предприятий-изготовителей конечной продукции (сушка, упаковка), складских терминалов, дистрибьюторов, 3PL и 4PL-провайдеров, которые обладают определенными ресурсами. Взаимодействие участников бизнес процессов в ЦПС отражается множеством материальных, финансовых и информационных потоков, а также потоков услуг от источников исходного сырья до конечного потребителя. Многообразие регионов мира, из которых осуществляются поставки в Украину сухофруктов, широкая номенклатура поставляемой продукции, урожайность, колебание курсов валют, сезонность являются причинами возникновения высокого уровня неопределенности в процессах формирования и принятия решений участниками ЦПС.

По своей природе, ЦПС является сложной стохастической системой [1,2], для функционирования которой характерны следующие особенности: сравнительно большое число юридически независимых участников бизнес процессов (включая таможенных брокеров); трудно формализуемый характер взаимодействия между участниками ЦПС, которые зачастую конкурируют между собой; наличие собственной целевой функции у каждого участника, противоречащей интересам других; высокая динамика

изменения связей внутри системы; нестационарность большинства процессов, имеющих место при функционировании ЦПС.

Указанные обстоятельства определяют недостаточную эффективность существующей ЦПС и диктуют необходимость ее модернизации за счет расширения концепции SCM (управления цепями поставок) [3-5] путем дополнения ее знаниеориентированными средствами поддержки принятия решений, что даст возможность достижения конъюнктивного консенсуса между всеми элементами ЦПС [6-8].

Для обслуживания ЦПС к настоящему времени разработано множество различных схем, способов и методов, выбор которых зависит от факторов, описывающих динамичность функционирования конкретного варианта реализации цепи [9].

Необходимым условием эффективного управления ЦПС является координация совместной деятельности участников ЦПС и синхронизация их бизнес-процессов, что, в конечном счете, достигается повышением эффективности: формулирования целей и задач ЦПС, разработки стратегии действий на основе глубокого и всестороннего анализа рынка поставок (включая требования конкретного заказчика) и текущего состояния цепи поставок сухофруктов в Украину.

Цель статьи состоит в изложении подхода к модернизации существующей логистической цепи поставок сухофруктов в Украину путем разработки и интеграции с действующей ЦПС методических и программных средств, реализующих координацию элементов цепи с применением интеллектуальных

агентов. Использование такого подхода даст возможность повысить эффективность бизнес процессов в цепи за счет снижения уровня неопределенности в принятии решений участниками ЦПС.

Результаты исследований

В существующих на данный момент вариантах реализации ЦПС в качестве основного средства компьютерной поддержки применяется среда визуального моделирования AnyLogic, в которой создание графических моделей реализуется на объектно-ориентированном языке Java. Этим AnyLogic отличается от большинства инструментов моделирования, в которых применяется специализированный язык, разработанный для работы только с конкретным инструментом. К преимуществам разработки системно-динамических моделей в среде AnyLogic по сравнению с использованием универсальных языков программирования, следует также отнести использование графической нотации моделей, автоматическое определение зависимостей между параметрами, а также их классифицирование в терминах системной динамики [10].

Любой объект модели, разрабатываемой в AnyLogic, представляет собой класс на языке Java, пользователь может добавить в модель свои классы, переопределять методы базовых классов, использовать базовые и разработать свои библиотеки классов и т. п. По модели, представленной в графическом редакторе, AnyLogic генерирует Java-программу, с которой работает написанный на Java «движок». При построении модели в AnyLogic разработчик, фактически, создает Java-классы активных объектов и определяет отношения между ними. Во время реализации модель представляет собой иерархию экземпляров активных объектов. Собранная модель может работать локально, на одном компьютере, или же пользователь может одним кликом мыши построить Java-апплет, который можно запустить под управлением браузера. Основной сущностью в модели, разрабатываемой в среде AnyLogic, является активный объект. Активный объект имеет внутреннюю структуру и поведение, он может инкапсулировать в качестве элементов другие активные объекты. Структура активного объекта определяет, из каких элементов он состоит, и какие связи существуют между инкапсулированными объектами. Поведение определяет реакции активного объекта на внешние события – логику его действий во времени. Число уровней вложенности объектов структуры, и вложенность состояний, представленных в картах состояний произвольны, что позволяет отражать в моделях поставок сухофруктов структурную и поведенческую иерархию ЦПС [7].

В среде AnyLogic 6 [10] разработан класс Logger, предоставляющий удобный программный

интерфейс для записи логов модели в текстовые файлы. Использование текстовых файлов для записи логов дает возможность сократить время записи данных в 40–60 раз по сравнению с записью в Excel-файлы и базы данных (например, запись 100000 строк по 5 чисел в строке занимает 60 секунд при использовании Excel-файла и 1 секунду при использовании текстового файла). В проекте по моделированию ЦПС необходимы следующие логи: лог перемещений товаров между звеньями логистической цепи; лог остатков товаров на складах по датам; лог размещенных заказов на поставку сухофруктов от дистрибьюторов; лог размещенных заказов на пополнение складов, лог выполненных заказов на поставку от дистрибьюторов.

Вместе с тем, среда AnyLogic 6 имеет недостаточно развитую функциональность в аспекте синтеза логистических моделей, адекватно отражающих процессы поставок сухофруктов с учетом большого количества разнородных факторов, имеющих высокую динамику изменения во времени. В силу указанного выше, целесообразным представляется интеграция AnyLogic 6 с особым образом построенной многоагентной системой. Под интеллектуальным агентом принято понимать объект, имеющий внутреннее поведение и возможность взаимодействовать с другими агентами [11]. Каждый агент имеет неполную информацию или недостаточные возможности для выполнения общей задачи и в отсутствие централизованного управления должен выполнить ее в кооперации с другими агентами. Моделирование многоагентных систем применяется в настоящее время при анализе социальных процессов, процессов урбанизации и даже при исследовании рынка в анализе предпочтений различных социальных групп [12]. Существуют несколько инструментальных средств, поддерживающих моделирование в этой области [13].

Моделирование многоагентных систем не противоречит идеологии AnyLogic, поскольку основной идеей в AnyLogic является то, что модель состоит из активных объектов, каждый из которых имеет свое поведение, причем объекты взаимодействуют между собой через явно определенные интерфейсы. Исходя из приведенных выше соображений, агентный подход к построению моделей в среде AnyLogic даст возможность повысить эффективность функционирования ЦПС в части адекватности представления поведения элементов цепи и конфликтов, возникающих при их взаимодействии. Диаграмма разработки полной логистической цепи S с учетом информации обо всех входящих в нее звеньях, формально представляется набором объектов

$$G_S = \langle A_S, D_S, C_D, T_A, E_D, P_E, A_T, A^D, C^D, D^E, E^P \rangle$$

и диаграммой, отражающей их взаимодействие (рис. 1).

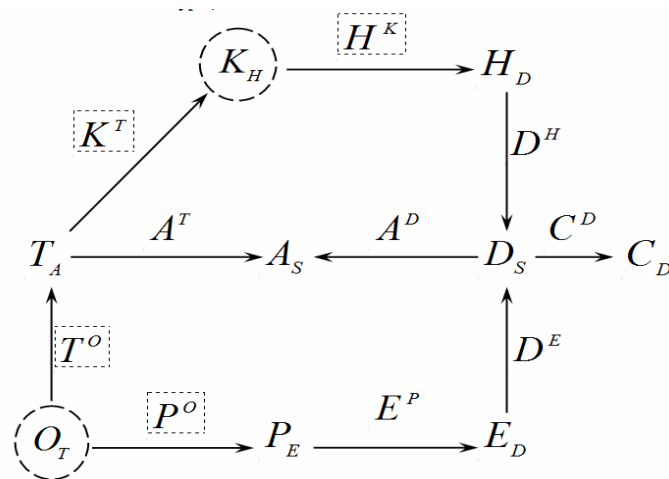


Рис. 1. Диаграмма функционирования ЦПС с учетом информации о производстве сырья

При этом использованы такие обозначения:

H_D – декартово произведение множеств характеристик различных видов сухофруктов, которые входят в общий объем поставки по каждому виду в пределах заданной номенклатуры,

$$H_D = \bigcup_i (H_i \times H_j), i \neq j;$$

D_H – сюръективное отображение множества характеристик импортируемых сухофруктов на их номенклатуру;

K_H – множество совокупностей характеристик товаров, отнесенных к признакам потенциальных коллизий в поставках;

H^K : $K_H \subset H_D$ – выделенные признаки потенциальных коллизий;

K_T – отображение, которое выделяет признаки потенциальных коллизий из всех совокупностей характеристик товаров в зависимости от требований к конкретной партии поставок;

O_T – ограничения, которые накладываются на параметры отдельных видов сухофруктов (биективное отображение P_0) в зависимости от требований к партии в пределах конкретной поставки (отображение T_0) – является «техническим состоянием поставки»

Признак существования коллизии:

$$P^O(O_i) \neq P_j$$

при

$$\begin{aligned} E^P(P_j) = E_K, D^E(E_K) = D_m, A^D(D_m) = \\ = A_r, A^T(T_g) = A_r, T^O(O_i) = T_g, \end{aligned}$$

т.е. расхождение ограничения и параметров конкретного вида товара при включении его в партию поставки, которая и определяет эти ограничения.

Множество K_H формируется на основе опыта и знаний эксперта, который по определенным признакам, при формировании партии товара, может предугадать появление коллизии в будущем в различных звеньях ЦПС.

Множество O_T , по сути, является множеством координирующих решений, т.к. оно представляет собой ограничения, которые необходимо наложить на параметры некоторых видов товаров, входящих в партию поставки, для реализации полной логистической цепи.

Множество K_H является результатом действий первого агента-распознавателя коллизий в создаваемой ЦПС.

Факт наличия или отсутствия P_0 является результатом работы второго агента-распознавателя распознавателя в логистической цепи.

Отображения K^T и H^K представляют собой зависимости, используемые первым агентом-распознавателем для выявления потенциальных коллизий. Характер этих отображений может быть знаниями, в случае невозможности построения аналитической зависимости для выделения признаков потенциальных коллизий из общего множества признаков видов товаров в формирующейся партии, а также зависимости для формирования самого решения.

Для примера, такими признаками могут являться: принадлежность в рамках одного вида товара (изюм) к различным сортам винограда, использованного в качестве исходного сырья; повышенные требования к отдельным параметрам, указанные в запросе на поставку – удельное содержание воды, сахара и др.

Отображение P_0 представляет собой знания, используемые вторым агентом-распознавателем для проверки реального существования коллизии.

Отображение T_0 представляет собой знания, используемые координатором для формирования координирующего решения по обнаруженной коллизии.

Множества признаков, а также видов координирующих решений получают из анализа предметной области и для логистики сухофруктов образуют небольшие по мощности (порядка 10-20) представительные счетные множества. Знания о форми-

ровании этих множеств могут быть получены как путем анализа существующих цепей поставок, так и путем приобретения знаний экспертов. Следовательно, работа координатора сводится к выбору рационального варианта координирующего решения при условии требований, накладываемых запросом на поставку.

Работа агента-распознавателя заключается в выделении совокупностей признаков товаров, входящих в партию поставки в зависимости от требований, выдвигаемых запросом на поставку. Множество признаков потенциальных коллизий для предметной области «Поставки сухофруктов в Украину» также представляет собой обозримое множество, которое также может быть получено путем приобретения экспертных знаний у опытных логистов.

Интеллектуальная поддержка формирования координирующих решений заключается в распознавании потенциальной коллизии, проверке реального существования коллизии и выдачи координирующего решения в случае несогласования.

Проверка реального существования рассогласования необходима, ввиду определенной специфики выделяемых признаков потенциальных коллизий, поскольку эти признаки могут образовать большое по мощности множество видов товаров, для которых уже предусмотрены меры по согласованию параметров с требованиями запроса на поставку.

Таким образом, используя описанную выше модель ЦПС, можно формально записать метод формирования координирующих решений при создании полной логистической цепи поставок сухофруктов следующей последовательностью шагов:

1. Для каждой из операций G_S формирования партии поставки S выделить (используя отображение K_H) признаки наличия потенциальных коллизий $H^K : K_H \subseteq H_D$ и сформировать конфликтное множество логистических операций из A_S .

2. Определить тип каждой потенциальной коллизии. Сформировать два подмножества – признаков разрешимых K_H^* и неразрешимых K_H^- в автоматизированном режиме коллизий. Для неразрешимых коллизий выполнить запрос к пользователю для формирования возможных координирующих решений.

3. Для каждой разрешимой коллизии из K_H^* определить задействованные в коллизии виды товаров (подмножество $D_S = f^{-1}(K_H^*)$ как полный прообраз признаков разрешимых коллизий).

4. Путем анализа запроса на поставку (элементы множества C^D) определить предыдущее звено в ЦПС для каждого вида товара, задействованного в коллизии, и соответствующий распознаватель.

5. Сформировать необходимые ограничения O_T для требований логистической операции из множества A_S .

6. Осуществить проверку реального существования коллизии, выполнив запрос к соответствующему распознавателю (определить истинность $P_0(O_i) = P_j$).

7. В случае существования коллизии (если $P_0(O_i) \neq P_j$) – определить метод ее разрешения по существующей, априорно созданной базе знаний разрешения типовых коллизий.

8. Сформировать координирующее решение (из множества O_T) для каждой выявленной коллизии, выдать его лицу, принимающему решения и занести решение в репозиторий прецедентов.

Каждый из шагов метода может быть конкретизирован соответствующим образом при его алгоритмической и программной реализации.

Выделение признаков наличия потенциальных коллизий – вложенное поведение распознавателя, оно не показано на рис. 1. Аналогично, этап проверки существования коллизии так же не отражен на диаграмме (рис. 1).

Последовательность действий на каждом шаге будет различаться в зависимости от способа реализации метода, особенностей программной платформы, выбранной за основу, а также от организации интерфейсной части диалоговой системы поддержки принятия решений по функционированию ЦПС.

Данный метод позволит выявлять потенциальные коллизии по признакам товаров, входящих в партию поставки, и требованиями, содержащимися в запросе на поставку. В случае возникновения коллизии метод даст возможность сформировать координирующее решение, которое устраним вероятное будущее рассогласование и обеспечит ликвидность партии товара при выполнении условий запроса на поставку.

Для формирования базы знаний могут быть использованы стандартные методы приобретения знаний, как по существующим решениям (множество O_T), используя их в качестве обучающей выборки, так и применением методов извлечения знаний экспертов.

Используемые методы разрешения коллизий основаны на так называемом методе компенсации, то есть отказе от выполнения каких-либо операций в логистической сети, либо на изменении параметров таких элементов как вид товара, с целью дальнейшего, беспрепятственного выполнения логистических операций с этими элементами при формировании партии поставки сухофруктов.

Выводы

На основе изложенного выше материала, можно сделать следующие выводы:

1. Анализ предметной области «Поставки сухофруктов в Украину» показал, что ряд особенностей реализации бизнес процессов в этой области

порождает высокий уровень неопределенности при формировании и принятии решений, и делает не эффективным применение стандартных компьютерных средств организации логистических цепей.

2. Показано, что для повышения эффективности функционирования ЦПС целесообразно дополнение среды формирования логистических цепей поставок AnyLogic интеллектуальным компонентом.

3. Предложена концепция построения интеллектуального компонента в AnyLogic на основе технологии многоагентных систем.

4. Рассмотрены модели интеллектуальных агентов для выявления и устранения коллизий, возникающих при функционировании ЦПС.

Список литературы

1. Crainic, T.G., Dejax, P.J., Delorme, L. Models for Multimodal Multicommodity Location Problems with Interdependent Balancing Requirements. // *Annals of Oper. Res.* – 1989. – 18. – P. 279-302.
2. Crainic, T.G., Delorme, L. Dual-Ascent Procedures for Multicommodity Location-Allocation Problems with Balancing Requirements. // *Transp. Sci.* – 1995. – 27(2). – P. 90-101.
3. Бочкарев А.А. Планирование и моделирование цепи поставок: Учебно-практическое пособие. – М.: Альфа-Пресс, 2008. – 192с.
4. Бродецкий Г.Л. Моделирование логистических систем. Оптимальные решения в условиях риска. – М.: Вершина, 2006. – 376 с.
5. Вагнер М. Штефан. Управление поставщиками / Пер. с нем. Под ред. А.Г. Ахметзянова. – М.: КИА центр, 2006. 128 с. (Библиотека логиста).
6. Беспалов Р.С. Транспортная логистика. Новейшие технологии построения эффективной системы доставки. – М.: Вершина, 2007. – 384 с.
7. Геррами В.Д., Колик А.В. Управление транспортными системами. Транспортное обеспечение логистики. Учебник - М.: Юрайт., 2015. – 512 с.
8. Дыбская В.В., Зайцев Е.И., Сергеев В.И., Стерлигова А.Н. Логистика. Интеграция и оптимизация логистических бизнес-процессов в цепях поставок: Учебник для МВА / Под общ. ред. проф. В.И. Сергеева. – М.: Эксмо, 2014. – 944 с.
9. Корпоративная логистика в вопросах и ответах. / Под ред. проф. В.И. Сергеева. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2017.
10. Бауэрсокс Д.Дж., Клосс Д.Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок. 2-е изд. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2008. – 640 с.
11. Беззубова Ю.О. Модели программных агентов в задачах информационного поиска // *Славянский форум*. 2015. № 2(8). С. 41-49.
12. Маркелов В.М. Применение мультиагентных систем для управления логистическими системами // *Славянский форум*. 2014. № 2 (6). С. 82-87.
13. Лукинский В.С., Шульженко Т.Г. Моделирование временных составляющих логистического цикла при реализации технологии «точно в срок» // V Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика», Т. II. – СПб. – 2011. – С. 145–151.

Надійшла до редколегії 31.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Чухрай, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків.

ЗНАННЯОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПО ФОРМУВАННЮ ПОВНОГО ЛОГІСТИЧНОЇ ЦЕПИ ПОСТАВОК СУХОФРУКТІВ В УКРАЇНІ

Яшар Рахімі

Проаналізовано проблеми, пов'язані з підвищенням ефективності функціонування існуючої логістичної ланцюга поставок сухофруктів (ЦПС) на ринок України з різних регіонів світу. Показано, що головною проблемою в забезпеченні успішного функціонування ЦПС є різні види невизначеності, що має місце при формуванні та прийнятті рішень учасниками ЦПС. Запропоновано модернізувати математичне та інформаційне забезпечення ЦПС шляхом доповнення застосовуваної в даний час середовища моделювання AnyLogic засобами штучного інтелекту та інженерії знань. В якості такого засобу запропоновано використовувати технологію мультиагентних систем (МАС). Застосування технології МАС забезпечить можливість адекватного уявлення в середовищі AnyLogic динаміки функціонування ЦПС з огляду на велику кількість різномірних, що змінюються в часі чинників, які безпосереднім чином впливають на ефективність функціонування ЦПС.

Ключові слова: підтримка прийняття рішень, поставки сухофруктів, логістична система, ланцюги поставок, моделювання бізнес процесів, штучний інтелект, інженерія знань, інтелектуальний агент.

KNOWLEDGE-ORIENTED APPROACH TO THE ORGANIZATION OF SUPPORTING DECISION-MAKING THE FORMATION OF A COMPLETE LOGISTIC CHAIN SUPPLYING DRIED FRUITS TO UKRAINE

Yashar Rahimi

The problems connected with increasing the efficiency of functioning of the existing logistics chain of deliveries of dried fruits (CSP) to the Ukrainian market from various regions of the world are analyzed. It is shown that the main problem in ensuring the successful functioning of the CSP are the various types of uncertainty that takes place in the formation and decision-making of the participants in the CSP. It is proposed to modernize the mathematical and information support of the CSP by supplementing the current AnyLogic modeling environment with artificial intelligence and knowledge engineering. As such a tool, it is proposed to use the technology of multi-agent systems (MAS). Application of the MAS technology will provide an opportunity for adequate representation in the AnyLogic environment of the dynamics of the DSP functioning, taking into account the large number of heterogeneous, time-varying factors that directly affect the performance of the DSP.

Keywords: decision support, supply of dried fruit, logistics system, supply chain, business process modeling, artificial intelligence, knowledge engineering, intelligent agent.

УДК 004.045: 621.396.96

І.В. Свид, А.І. Обод

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ПОЄДНАННЯ ДАНИХ ОГЛЯДОВИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

У статті наводиться аналіз відомих методів поєднання даних оглядових систем спостереження повітряного простору на етапі третинної обробки та пропонується здійснювати поєднання даних в мережі систем спостереження на етапі сигнальних даних чи на етапі первинної обробки даних. Показано, що реалізація централізованої обробки сигнальних рішень та первинної обробки даних дозволяє здійснити сумісну оптимізацію обробки даних та підвищити показники якості інформаційного забезпечення користувачів системи контролю повітряного простору.

Ключові слова: поєднання даних, первинна обробка даних систем спостереження.

Вступ

Постановка проблеми й аналіз літератури.

Підвищення якості інформаційного забезпечення (ІЗ) користувачів системи контролю повітряного простору (ПП) неможливо без використання інформаційних технологій (ІТ) у процесі отримання, збору, обробки, зберігання й розповсюдження даних систем спостереження (СС) [1,2]. Повну картину повітряної обстановки надають первинні та вторинні СС [3-7]. Дійсно, первинна СС надає дані про місцезнаходження ПО, тобто відповідає на запитання «де», а система ідентифікації відповідає на запитання «хто». Наявність вторинної СС дозволяє отримати польотну інформацію з борту ПО.

Завдання обробки даних (ОД) від декількох джерел завжди залишається актуальною, оскільки дозволяє знизити похибки окремих вимірів і підвищити стійкість і достовірність спостережень. Еволюція будь-яких інформаційних систем (ІС) приводить до їхнього об'єднання в мережу. Мережевий принцип організації ІС показав свої переваги при рішенні широкого кола завдань. Слід зазначити, що ІЗ споживачів системи контролю повітряного простору завжди було побудовано за мережевим принципом. Дійсно третинна обробка інформації (ТОІ) передбачає об'єднання трас ПО, отриманих різними СС. Отже, у цьому випадку, СС ПП утворювали некогерентну несинхронну мережу СС ПП. Здійснення мережевої обробки даних, у повному обсязі, може підвищити показники якості даних за рахунок оптимізації обробки даних, що у теперішній час не використовується.

Мета роботи. Аналіз інформаційної структури поєднання даних СС повітряного простору.

Основна частина

Обробка даних в СС, як правило, здійснюється за допомогою електронної обчислювальної машини

(ЕОМ), структурно включеної після сигнального процесору, головна задача котрого здійснити обробку сигнальних даних [1, 2].

Цифрова обробка даних здійснюється на про- тязі декількох циклів обзору СС, тоді як обробка сигнальних даних здійснюється лише за кількома імпульсам опромінення повітряного об'єкту (ПО) в одному циклі огляду. У мережах СС реалізація ОД може бути зосереджена на провідній СС або розподілена за різними позиціями.

Процесор даних СС може бути визначений як сукупність реалізованих на ЕОМ алгоритмів, які за інформацією, одержуваної в декількох послідовних циклах огляду, дозволяють:

- ідентифікувати виявлені сигнали, що відносяться до одного і того ж ПО;
- оцінювати кінематичні параметри ПО (координати, швидкість і прискорення), забезпечуючи таким чином формування траєкторії;
- екстраполювати траєкторії;
- розрізняти ПО і формувати траєкторії кожної з них;
- виділяти справжні ПО на тлі хибних тривог, обумовлених як навмисними, так і природними завадами;
- адаптивне коригувати граничний рівень процесора сигнальних даних, змінюючи чутливість СС в залежності від просторового напрямку з урахуванням карти хибних тривог, обновлюваної на кожному циклі огляду;
- формувати програму огляду простору СС з фазованою антеною решіткою для супроводу ПО, що маневрують із заданою точністю, а також оптимальним чином поєднувати супровід цілей з оглядом простору і іншими функціями СС;
- ефективно використовувати інформацію виявлення або супроводу, що надходить від різних СС, об'єднаних в мережу і контролюючих одну і ту ж область простору.

Остання задача ОД відноситься до третинної обробки даних. Третинна обробка даних СС це поєднання даних різних СС за однойменними ПО з метою поліпшення характеристик спостереження:

- характеристик виявлення;
- характеристик вимірювання координат і параметрів руху ПО.

На цьому етапі обробки вирішується задача обробки даних СС ПП, що припускає виконання наступних функціонально закінчених операцій:

- приведення позначок місця розташування ПО до єдиної системи координат;
- приведення позначок місця розташування ПО до єдиного часу відліку;
- ототожнення (ідентифікація) траєкторій, отриманих від декількох джерел по тому самому ПО;
- обчислення параметрів об'єднаних (усереднених) траєкторій.

Для вирішення цих задач можуть бути використані всі характеристики ПО.

Однак координати ПО вимірюються в системі координат СС, тому при передачі даних на пункт ТОД необхідно перерахувати їх до точки стояння приймача даних. В АСУ передача координат ПО зазвичай здійснюється в прямокутній системі координат. На пункті обробки також використовується прямокутна система. Отже, завдання зводиться до перетворення прямокутних координат ПО щодо точки стояння джерела в прямокутні координати щодо точки стояння пункту обробки.

Єдиний час необхідно для того, щоб визначити положення оброблюваних відміток станом на якийсь один момент часу. Ця операція значно полегшує завдання ототожнення відміток ПО.

Для приведення до єдиного часу приймається модель руху ПО в єдиній системі координат з постійною швидкістю, тобто

$$\bar{W}(i) = \bar{\Phi}(i, i-1)\bar{W}(i-1),$$

$\bar{\Phi}$ - перехідна матриця яка дорівнює де

$$\bar{\Phi}(i, i-1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 & 0 & T \\ - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де $T = t_i - t_{i-1}$.

Приведення вектору стану до заданому моменту часу $t_s > t_i$ виконується відповідно виразу

$$\bar{W}(s) = \Phi(s, i)\bar{W}(i)$$

для $T = t_s - t_i$.

Так як звичайний час екстраполяції невеликий, тому і застосовується лінійна екстраполяція.

Задача ототожнення позначок вирішується у два етапи. Спочатку позначки групуються за їх потраплянням у строб припустимих відхилень, що визначається погрішностями оцінки координат. Потім проводиться ототожнення позначок та їх об'єднання.

У більшості відомих системах ТОД здійснюється на етапі об'єднання трас ПО. Дійсно, в обчислювальному відношенні переважно спочатку прокладати траєкторії ПО незалежно за даними кожного джерела, а на наступному етапі – етапі третинної обробки – використовувати їх для підвищення якості даних, що надається особі яка приймає рішення. Траєкторії кожного ПО, що спостерігається з різних ракурсів кількома СС, при узагальненні дозволяють не тільки точніше визначити і передбачити місце розташування об'єкта, а й оперативно відслідковувати поточні значення похибки кожного джерела вимірювань.

Задачі ТОД у теперішній час вирішуються двома основними методами [2]:

- мозаїчна обробка;
- мультирадарна обробка.

При мозаїчній обробці кожній СС виділяється своя зона огляду, що не перетинається із зонами огляду інших СС. Для формування єдиного формуляра ПО використовується інформація тільки від однієї СС.

До недоліків даного методу відноситься задача супроводу траєкторій ПО при перетинанні границь зон огляду, а також не використання переваги перекриття зон виявлення сусідніх СС.

При мультирадарній обробці використовуються всі доступні СС для формування єдиного формуляра ПО.

Мультирадарна обробка повинна забезпечити стабільний супровід ПО і формування картини повітряної обстановки шляхом аналізу інформації, що надходить від декількох ІС. Як правило, ІС володіють різними характеристиками, так що в конкретних умовах може бути більш ефективний той чи інший радар. За інших рівних умов на великих відстанях буде ефективний радар, що володіє більшою потужністю. В областях великої щільності руху і підвищеної маневреності ПО необхідний радар з невеликим періодом огляду.

Крім того, ефективність радара залежить від його розташування щодо навколишніх завад. Будинки, природний рельєф та інші елементи навколишньої місцевості можуть екранувати, відображати або перевідбивати випромінювання, в результаті чого в певних областях з'являються численні хибні відмітки (або пропадають справжні). Тому для отримання найбільш інформативної картини бажано використовувати інформацію від декількох СС, причому

враховувати особливості цих радарів та їх можливість стосовно конкретних ділянок зони дії системи КПП. Результатом мультирадарної обробки є мультирадарні траєкторії, розраховані з реальних за спеціальними алгоритмами.

Залежно від обставин при формуванні мультирадарної траєкторії може використовуватися траєкторія тільки від одного радара або відразу від декількох радарів, вимірювання яких усереднюються з різними ваговими коефіцієнтами.

Задача ототожнення позначок вирішується у два етапи.

Якщо в строб попадають позначки від багатьох СС, що належать декільком ПО, то задача групування вирішується в такий спосіб:

- складаються всі можливі варіанти групування;
- обчислюються різниці координат у кожній групі;
- обчислюється кореляційна матриця помилок \bar{C}_i^{-1} , як сума кореляційних матриць помилок координат, що групуються;
- для кожного варіанта групування складається квадратична форма $\bar{Q}_i = \bar{Z}_i^T \bar{C}_i^{-1} \bar{Z}_i$ та приймається варіант групування, для якого значення \bar{Q}_i , мінімальне.

Нехай, наприклад, у строб припустимих відхилень потрапили дві позначки з векторами стану $\bar{W}_{1,1}$ і отримані від першої СС, і одна позначка з векторами стану від другої СС. Кореляційні матриці помилок відповідно рівні \bar{C}_1 і \bar{C}_2 .

Можливі два варіанти групування:

$$\text{перший} - \bar{Z}_1 = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{1,2} \rightarrow \bar{Q}_2 \\ \bar{Q}_{1,2} \end{bmatrix},$$

$$\text{другий} - \bar{Z}_2 = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{1,1} \\ \bar{Q}_{1,2} \rightarrow \bar{Q}_2 \end{bmatrix}.$$

Кореляційні матриці помилок для першого й другого варіантів групування однакові й визначаються як

$$\bar{C}_0^{-1} = \bar{C}_1^{-1} + \bar{C}_2^{-1}.$$

Конкуруючі квадратичні форми можливо записати як:

$$\bar{Q}_1 = \bar{Z}_1^T \bar{C}_0^{-1} \bar{Z}_1 = \bar{Z}_1^T \bar{C}_0^{-1} \bar{Z}_1; \bar{Q}_2 = \bar{Z}_2^T \bar{C}_0^{-1} \bar{Z}_2.$$

Якщо $\bar{Q}_1 < \bar{Q}_2$, обирається перший варіант і навпаки. Для СС і ПО число варіантів групування можна визначити як

$$k = (m-1)!n!.$$

Із цієї формули видно, що воно різко зростає зі збільшенням m та n .

Задача формування одиничних вимірів вирішується усередненням координат ПО з вагами, обернено пропорційними дисперсіям помилок одиничних вимірів кожної СС.

Однак в єдиних ІС СС повітряного простору поєднання даних за однойменними ПО може здійснюватися і на етапах:

- обробки сигнальних даних;
- первинної обробки даних (ПОД);
- вторинної обробки даних (ВОД).

Дійсно, якщо сигнальні або первинні дані, отримані в окремих пунктах спостереження, передати і зосередити в деякому центрі обробки, то це об'єднання дозволить використовувати в інтересах поліпшення характеристик спостереження не тільки додаткову енергетику, але і кореляційні зв'язки прийнятих сигналів, а також просторову подібність первинних даних про один об'єкт від різних джерел, обумовлене наявністю ПО в певній точці простору.

Основою об'єднання сигнальних даних є наявність розсіяного або випроміненого ПО сигналу в просторі, що набагато перевершує за розмірами обмежений простір однопозиційного спостереження. Остання задача третинної обробки вирішується методами, розглянутими при вторинній обробці.

Проведемо оцінку результатів поєднання сигнальних даних в мережі СС ПП з трьома пунктами прийому. На кожному пункті прийому здійснюється виявлення сигналів, рішення про яке передається на пункт сумісної обробки на якому здійснюється:

- поєднання рішень про виявлення сигналів (критерії 1/3;2/3;3/3);
- виявлення ПО;
- виявлення зав'язки траси ПО.

Будемо вважати, що виявлення ПО здійснюється за правилом $K/N = 12/25$, а зав'язка траси ПО - $1/m = 2/3$. Характеристики виявлення траси ПО при поєднанні на рівні виявлення сигналів, тобто сигнальних даних, наведені на рис. 1. Ймовірність хибної тривоги дорівнює $F = 10^{-3}$.

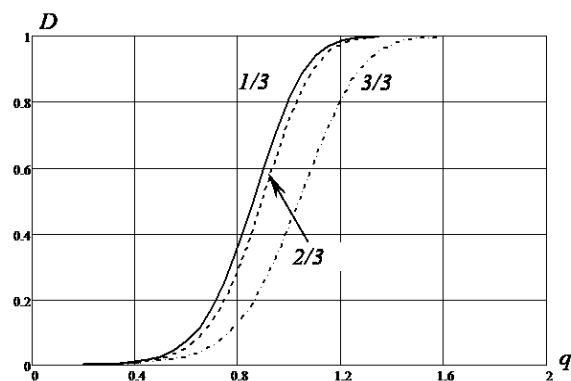


Рис. 1. Поєднання даних на рівні сигнальних даних

Проведемо оцінку результатів поєднання виявлених ПО в мережі СС ПП з трьома пунктами прийому. На кожному пункті прийому здійснюється виявлення сигналів та виявлення ПО рішення про яке передається на пункт сумісної обробки на котрій здійснюється:

- поєднання рішень про виявлення повітряного об'єкту (критерії 1/3;2/3;3/3);
- виявлення зав'язки траси ПО.

Характеристики виявлення траси повітряного об'єкту при поєднанні на рівні виявлення ПО наведені на рис. 2.

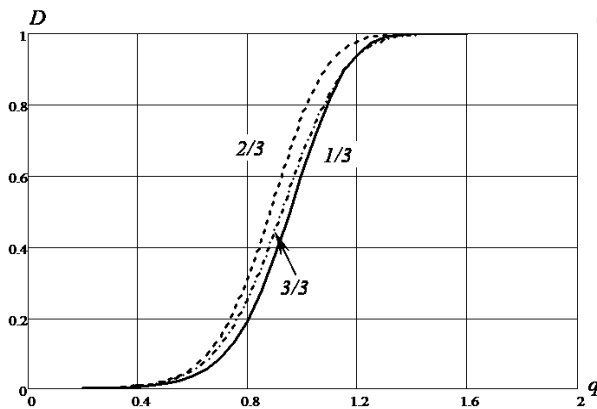


Рис. 2. Поєднання даних на рівні ПОІ

Наведені розрахунки показують, що поєднання рішень про однойменні ПО більш доцільно здійснювати на рівні виявлення ПО для більш жорстких логік обробки і навпаки.

Порівняльний аналіз рис. 1 та 2 показує, що менш жорстких логіках обробки поєднання на рівні сигнальних даних більш доцільно. Дійсно для логіки 1/3 та відношення с/ш 0,8 вигреш в імовірності виявлення траси повітряного об'єкту зростає у два рази.

Висновки

Отримані показники якості інформаційного забезпечення користувачів системи КПП показали доцільність використання сумісної обробки даних СС ПП при широкому застосуванні ІТ на етапах поєднання сигнальних рішень та первинної обробки даних, що дозволяє здійснити наскрізну оптимізацію обробки даних.

Список літератури

1. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с.
2. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации / под ред. С.Г. Пятко и А.И. Краснова. - СПб.: Политехника, 2004.
3. Моделирование аэронавигационных систем. Обработка информации та прийняття рішень у системі керування повітряним рухом: навч. посіб. / В.М. Васильев, В.П. Харченко. – К.: НАУ, 2008. – 108 с.
4. Stevens M.C. Secondary Surveillance Radar / M.C. Stevens. - Artech House, 1988.-345 с.
5. Garcia M.L. Test For Success: Next Generation Aircraft Identification System RF Simulation / M.L. Garcia. - IEEE ICNS '07, 007.
6. Ray P.S. A novel pulse TOA analysis technique for radar identifications. / P.S. Ray - IEEE Transactions on Aerospace And Electronic systems, vol.34, No.3, pp.716-721, 1998.
7. Ahmadi Y. Deinterleaving of Interfering Radars Signals in Identification Friend or Foe Systems / Y.Ahmadi, K.Mohamedpour, M.Ahmadi - 18th Telecommunications forum TELFOR 2010, Serbia, Belgrade, November 23-25, 2010.

Надійшла 23.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.А.Серков, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

ОБЪЕДИНЕНИЕ ДАННЫХ ОБЗОРНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

И.В.Свид, А.И. Обод

В статье приводится анализ известных методов объединения данных обзорных систем наблюдения воздушного пространства на этапе третичной обработки и предлагается осуществлять сочетание данных в сети систем наблюдения на этапе сигнальных данных или на этапе первичной обработки данных. Показано, что реализация централизованной обработки сигнальных решений и первичной обработки данных позволяет осуществить совместную оптимизацию обработки данных и повысить показатели качества информационного обеспечения пользователей системы контроля воздушного пространства.

Ключевые слова: объединение данных, первичная обработка данных систем наблюдения

UNIFICATION OF DATA OF REVIEW SYSTEMS OBSERVATION OF THE AIR SPACE

I.V. Svyd, A.I. Obod

The article provides an analysis of the known methods of combining the data of the surveillance systems for airspace observation in the tertiary processing stage and proposes to perform a combination of data in the observation network at the stage of the signal data or at the stage of primary data processing. It is shown that the implementation of centralized processing of signal solutions and primary data processing allows for joint data processing optimization and improving the quality of information support for users of the airspace control system.

Keywords: data consolidation, primary processing of observational data.

УДК 004.9

В.А. Темников

Національний авіаційний університет, Київ

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АВИАТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Представлены основные составляющие метода повышения быстродействия и достоверности работы систем поддержки принятия решений по управлению информационной безопасностью авиатранспортных предприятий. Применение разработанного метода позволило обеспечить функционирование системы поддержки принятия решений в режиме реального времени при высокой степени достоверности ее работы.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, диспетчер, аутентификация, психофизиологическое состояние, распознавание образов, искусственная нейронная сеть.

Введение

В последнее время большую актуальность приобретает решение задач, связанных с обеспечением безопасности полетов в авиации.

Безопасность полетов не может быть обеспечена без применения систем управления информационной безопасностью авиатранспортных предприятий (АТП) и, в первую очередь, аэропортов. Это объясняется тем, что несанкционированный доступ злоумышленников к их информационным активам (базам данных, информационным потокам, циркулирующим в автоматизированных системах (АС) аэропортов и др.), ошибки диспетчеров (управления воздушным движением (авиадиспетчеров) и АС аэропортов) могут привести к опасным нежелательным последствиям, в том числе, человеческим жертвам и большим материальным потерям.

Для оказания помощи руководителям АТП в управлении информационной безопасностью разработана система информационной поддержки принятия решений. Задачей одной из ее подсистем (голосовой системы поддержки принятия оперативных решений (СППоР) по контролю за действиями авиадиспетчеров в процессе выполнения ими функциональных обязанностей) является оперативное выявление лиц, находящихся в ненадлежащем психофизиологическом состоянии (ПФС). Высокая значимость СППоР обусловлена тем, что нахождение диспетчера в возбужденном или депрессивном состоянии, состоянии утомления, сонливости или тревоги является одной из наиболее частых причин ошибок диспетчеров.

СППоР представляет собой интеллектуальную информационную систему, построенную с приме-

нением современных информационных технологий. Ее работа основана на анализе речевых сигналов, снимаемых с выходов микрофонов, которые диспетчеры эргатических систем АТП используют в процессе работы (в частности, авиадиспетчеры – в процессе проведения аудиообмена с членами экипажей воздушных судов). Использование такого биометрического признака человека, как голос, в качестве «инструмента» для контроля за действиями диспетчеров со стороны лиц, принимающих решения (ЛПР), позволяет осуществлять контроль бесконтактно, не отвлекая диспетчера от выполнения функциональных обязанностей.

Значимыми критериями эффективности функционирования СППоР являются быстродействие и достоверность работы.

В статье представлены основные составляющие метода повышения эффективности (быстродействия и достоверности работы) СППоР, применение которого позволило обеспечить функционирование разработанной СППоР в режиме реального времени при высокой степени достоверности ее работы. Результаты применения разработанного метода представлены применительно к СППоР по контролю за действиями авиадиспетчеров со стороны ЛПР в диспетчерских службах аэропортов.

В основе метода лежит обоснование структуры СППоР и информационных технологий, применяемых при проектировании подсистем СППоР.

Структурная схема разработанной СППоР и информационные технологии для построения ее подсистем

1. Контроль за действиями диспетчеров, в соответствии с разработанным методом, осуществля-

ется как последовательное проведение аутентификации и мониторинга ПФС по непрерывной речи.

Для повышения достоверности работы СППоР аутентификацию и контроль ПФС диспетчеров предлагается проводить по так называемым «ключевым» речевым фрагментам, представляющим собой сегменты слов (словосочетаний), часто употребляемых диспетчерами в процессе работы и являющихся элементами фразеологии, обязательной для употребления авиадиспетчерами в процессе проведения аудиообмена с членами летных экипажей.

Достоверность работы СППоР повышается в связи с тем, что, как показали проведенные исследования, информативные параметры речевых сигналов зависят, например, от месторасположения гласных фонем в речевых фрагментах, по которым проводятся аутентификация диспетчеров и определение их ПФС.

Структурная схема СППоР в этом случае будет представлять собой последовательность таких подсистем: предварительной обработки речевого сигнала, снимаемого с выхода микрофона, выявления «ключевых» речевых фрагментов в непрерывной речи диспетчера, распознавания и определения ПФС человека (контролируемого лица).

2. Подсистема предварительной обработки речевого сигнала осуществляет его шумоочистку и сегментацию на речевые фрагменты, среди которых в дальнейшем будут выявлены «ключевые» речевые фрагменты.

Снижение зашумленности речевого сигнала повышает точность определения информативных параметров речевого сигнала, и таким образом приводит к повышению достоверности работы СППоР.

При применении разработанного метода шумоочистка и сегментация речевого сигнала проводятся с применением вейвлетов.

3. Подсистема выявления «ключевых» речевых фрагментов осуществляет их поиск среди речевых фрагментов, полученных на выходе модуля сегментации.

4. По найденным «ключевым» речевым фрагментам подсистемами распознавания человека и определения его ПФС проводятся соответственно аутентификация и определение ПФС.

5. Подсистемы выявления «ключевых» речевых фрагментов, распознавания контролируемых лиц и определения ПФС, в соответствии с теорией распознавания образов [1], состоят из модулей параметризации, классификации и принятия решения, а также включают в себя базы данных параметров, характеризующих соответственно речевой сигнал («ключевые» речевые фрагменты), человека (контролируемое лицо) и его ПФС.

6. Модули классификации подсистем выявления «ключевых» речевых фрагментов и распознавания контролируемых лиц в разработанной СППоР построены с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) [2], обученных на распознавание соответственно речевых фрагментов и человека.

Обе ИНС имеют одинаковую топологию и архитектуру (в частности, в обеих подсистемах в качестве ИНС рекомендуется применять многослойные перцептроны с одним скрытым слоем). Применение ИНС в обеих подсистемах позволило в значительной степени унифицировать систему поддержки принятия оперативных решений.

Построение модулей классификации подсистем СППоР с применением искусственных нейронных сетей позволяет ускорить процесс классификации, а, следовательно, и всей системы в целом, по сравнению с методами, основанными на вычислении расстояний между векторами параметров, на применении скрытых марковских моделей, методом DTW и др. [3].

7. Возможность применения ИНС в качестве основы для построения модулей классификации ограничивается количеством параметров сигналов, поступающих на ее входы. В наших разработках модули параметризации подсистем выявления «ключевых» речевых фрагментов и распознавания человека строятся на основе метода кратковременного анализа [3].

При этом определение информативных параметров речевых сигналов основывается на расчете кепстральных коэффициентов на каждом фрейме, на которые делится «ключевой» речевой фрагмент. В случае непосредственного использования в качестве информативных параметров таких кепстральных коэффициентов, их количество, а, значит, и количество входных параметров ИНС, достигало бы значительных величин (с учетом того, что количество кепстральных коэффициентов на одном фрейме составляет от 12 до 20 единиц, а количество фреймов – несколько десятков).

Для обеспечения возможности построения модулей классификации подсистем выявления «ключевых» речевых фрагментов и распознавания человека на основе ИНС было необходимо существенно уменьшить количество информативных параметров речевых сигналов, подаваемых на вход ИНС. Это было достигнуто в процессе разработки новой системы информативных параметров, базирующихся на кепстральных коэффициентах линейного предсказания (ККЛП), рассчитываемых на каждом фрейме, на которые разбиваются «ключевые» речевые фрагменты. Применение разработанной системы информативных параметров позволило существенно (более чем на порядок) уменьшить

количество входных параметров (нейронов) искусственной нейронной сети без сколько-нибудь существенного уменьшения процента правильной аутентификации человека.

8. Дальнейшее повышение достоверности определения степени утомления, сонливости и тревоги может быть достигнуто на основе введения контроля этих состояний во время регулярных перерывов в работе диспетчера по состоянию его сердечно-сосудистой системы (с применением портативных электрокардиографов). Оценить состояние сердечно-сосудистой системы диспетчера можно по пульсу и параметрам электрокардиограммы (в частности, по вариабельности сердечного ритма, определяемой по значениям кардиоинтервалов на основе работ Баевского Р.М., Кальниша В.В. и других ученых [4]).

контроль, в совокупности с психофизиологическим предсменным и послесменным психофизиологическим контролем, позволяет судить о тенденции изменения состояния диспетчера. Анализ тенденции изменения ПФС диспетчера в течение рабочей смены и от смены к смене, а также тенденции изменения его психофизиологического ресурса позволяет более обоснованно подходить к вопросам допуска авиадиспетчера на его рабочее место.

Пути повышения достоверности работы и быстродействия подсистем СППоР

Пути повышения достоверности работы и быстродействия подсистем распознавания человека и выявления «ключевых» речевых фрагментов в его непрерывной речи

1. Для повышения достоверности работы системы поддержки принятия оперативных решений в подсистемах распознавания человека и выявления «ключевых» речевых фрагментах предлагается применять ИНС с несколькими выходами.

При применении ИНС в подсистеме распознавания человека на каждом выходе ИНС рассчитывается вектор размерности n , i -й элемент которого является вероятностным значением того, что процедуру аутентификации проходит конкретный (i -ый) диспетчер, параметры которого занесены в соответствующую базу данных.

При применении ИНС с несколькими выходами в подсистеме распознавания речевых фрагментов получаем вектор размерности n , каждый (i -й) элемент которого есть вероятностное значение того, что поступивший на вход искусственной нейронной сети речевой фрагмент является одним из ключевых (параметры которого занесены в базу данных ключевых речевых фрагментов).

Применение искусственных нейронных сетей с несколькими выходами позволяет ускорить процессы аутентификации и поиска «ключевых» речевых фрагментов в непрерывной речи диспетчера, производя указанные действия одновременно по соответственно нескольким диспетчерам и речевым фрагментам.

Естественно, применение искусственных нейронных сетей с несколькими выходами сопровождается усложнением процесса обучения искусственных нейронных сетей.

2. Еще одним путем повышения достоверности работы и быстродействия системы поддержки принятия оперативных решений является обоснованный выбор параметров искусственных нейронных сетей.

Значения параметров искусственных нейронных сетей рассчитывались в процессе тестирования модулей параметризации и классификации по критерию максимума процента правильно проведенной классификации (процента правильной аутентификации / правильно классифицированных сигналов). Определялись следующие параметры модулей параметризации и классификации: длина фрейма, количество коэффициентов линейного предсказания, примененных при расчете ККЛП, количество ККЛП, количество нейронов в скрытом слое ИНС и количество эпох.

Исследования показали, что существенное влияние на быстродействие системы поддержки принятия оперативных решений оказывает количество нейронов в скрытом слое ИНС – результаты совместного анализа зависимости процента правильной аутентификации и времени проведения классификации от этого параметра свидетельствуют о том, что качество аутентификации незначительно зависит от количества нейронов в скрытом слое, между тем как продолжительность вычислений при увеличении количества нейронов скрытого слоя существенно возрастает.

3. Для обеспечения работы системы поддержки принятия оперативных решений в режиме реального времени (достижение этого режима являлось одной из целей исследований и разработки системы) время обработки сигналов не должно превышать усредненную длительность «ключевых» речевых фрагментов.

На практике была достигнута средняя продолжительность обработки в подсистемах распознавания человека и выделения «ключевых» речевых фрагментов из непрерывной речи на уровне 25 мс, что существенно меньше длительности «ключевых» речевых фрагментов. Это свидетельствует об обеспечении работы системы поддержки принятия оперативных решений в режиме реального времени.

Пути повышения достоверности работы подсистемы контроля ПФС авиадиспетчера

В соответствии с разработанным методом контроль ПФС предлагается проводить на основе сравнительного анализа контрольных и эталонных информативных параметров, характеризующих отдельные (в первую очередь, гласные) фонемы, входящие в состав «ключевых» речевых фрагментов.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, целью которых являлся анализ параметров, характеризующих речевые фрагменты, с точки зрения их эффективности для определения ПФС, показали, что для повышения достоверности работы системы поддержки принятия оперативных решений целесообразно увеличивать количество анализируемых информативных параметров.

В качестве информативных предлагается применять следующие параметры «ключевых» речевых фрагментов: частоту основного тона и связанные с ней параметры (изрезанность мелодического контура, дисперсия, среднее значение и др.), формантные частоты и их отношения, длительность произнесения «ключевых» речевых фрагментов.

Выводы

В статье приведены основные составляющие метода повышения достоверности работы и быстрого действия голосовой системы поддержки принятия оперативных решений, применение которых позволило обеспечить функционирование разработанной системы в режиме реального времени при высокой степени достоверности (процент правильной аутентификации выше 98%).

Обоснована структурная схема системы поддержки принятия оперативных решений, описаны информационные технологии, с применением ко-

торых разработан метод, представлены пути повышения достоверности работы и быстрого действия подсистем разработанной системы поддержки принятия оперативных решений.

В соответствии с разработанным методом аутентификация диспетчера по его непрерывной речи сводится к ее проведению по «ключевым» речевым фрагментам, выделенным из непрерывной речи диспетчера. Поиск и выделение из непрерывной речи «ключевых» речевых фрагментов осуществляется с применением введенной в состав системы поддержки принятия оперативных решений специальной подсистемы.

Подсистемы распознавания человека и выявления «ключевых» речевых фрагментов построены на основе методов теории распознавания образов. Предложен новый подход к построению подсистем распознавания человека и выявления «ключевых» речевых фрагментов, основанный на применении ИНС, обоснованном выборе их параметров, а также разработанной системе информативных параметров речевого сигнала.

Список литературы

1. Рамишвили Г.С. Автоматическое опознавание говорящего по голосу // М.: Радио и связь, 1981. – 224 с.
2. Хайкин С. Нейронные сети // 2-е изд. Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов // М.: Мир, 1978. – 848с.
4. Баевский Р.М. Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Клиническая информатика и телемедицина. – 2004. – № 1. – С. 54-64

Надійшла до редколегії 16.10.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Козловский, Національний авіаційний університет, Київ.

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ АВІАТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ

В.О. Темніков

Представлені основні складові методу підвищення швидкодії та достовірності роботи систем підтримки прийняття рішень з управління інформаційною безпекою авіатранспортних підприємств. Застосування розробленого методу дозволило забезпечити функціонування системи підтримки прийняття рішень в режимі реального часу при високому ступені достовірності її роботи.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, диспетчер, аутентифікація, психофізіологічний стан, розпізнавання образів, штучна нейронна мережа.

METHOD FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR INFORMATION SECURITY MANAGEMENT OF AIR TRANSPORT ENTERPRISES

V.A. Temnikov

The article presents the main components of the method for improving the speed and reliability of the decision support system for information security management of air transport enterprises. The application of the developed method allowed to ensure the functioning of the decision support system in real time mode with a high degree of reliability of its work.

Keywords: decision support system, air traffic controller, authentication, psychophysiological state, pattern recognition, artificial neural network.

УДК 004.891

И.В. Шостак¹, М.А. Данова¹, Р.Б. Капитан²¹ *Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*² *Черкасский государственный технологический университет, Черкассы*

РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО ФРАГМЕНТА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ КООРДИНИРУЮЩИХ РЕШЕНИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Описана технология разработки типового фрагмента производственной системы поддержки принятия решений (СППР) по организации производства на промышленных предприятиях. В отличие от известных производственных систем с искусственным интеллектом, данная СППР не только реализована в форме экспертной системы, но и допускает, за счет применения мультиагентной технологии, возможность интеграции различных центров принятия решений на предприятии, для формирования комплексных решений по координации производственных процессов. Обоснован выбор архитектуры агентов путем сравнения возможностей простого реактивного агента и агента типа BDI (Belief-Desire-Intension). Показано, что мультиагентная система, состоящая только из простых реактивных агентов, способна поддерживать процессы формирования, в среде СППР, координирующих решений по организации производства. Приведен вариант интеграции мультиагентной СППР с другими производственными информационными системами на примере пакета прикладных программ «Компас-Автопроект».

Ключевые слова: *промышленное предприятие, искусственный интеллект, экспертная система, мультиагентная технология, поддержка принятия решений, координирующие решения.*

Введение

На современном этапе развития машиностроительного производства эффективное управление им стало невозможным без применения методов и средств искусственного интеллекта [1, 2] и инженерии знаний [3, 4] (в основном в форме экспертных систем [5]), поскольку сложность объектов управления уже не допускала построения и реализации адекватных аналитических моделей.

Специфика машиностроительного производства и организации технологической службы приводит к тому, что основная работа по технологической подготовке производства (ТПП) и составлению технологической документации ложится на большое количество исполнителей (в основном на технологов в цеховых бюро), которые выполняют написание технологических процессов для своих производственных подразделений [6].

Весь комплекс задач ТПП образует многоуровневую структуру, состоящую из последовательности подсистем, объединенных информационными потоками. Результатом решения всего комплекса задач является конструкторско-технологическая документация для детали, необходимая для ее изготовления. При этом должны быть выполнены все эксплуатационные свойства, как заданные характеристики деталей, так и всего изделия в целом, в состав которого входит конструируемая деталь. Реализация указанного комплекса задач предполагает решение целого ряда более мелких задач разными исполнителями на разных уровнях иерархии управления производством.

Проектирование технологического процесса является сложной, плохо формализуемой задачей, имеющей следующие особенности [7]:

- многозадачность процесса проектирования и многовариантность принимаемых решений;
- разнородность конструктивно-технологических свойств изделий;
- сложность их представления в виде комплексной математической модели;
- разнородность технологических операций, применяемых при изготовлении изделий (установка, механообработка при образовании отверстий, покрытие, снятие припусков, деформирование и т.д.);
- сложность структуры технологического процесса (декомпозиция процесса).

Одной из особенностей принятия решений при ТПП является то, что технологическая проработка деталей и узлов проводится на уровне цехов (цеховыми технологами в бюро), причем технологические процессы на отдельные детали и агрегаты создаются обособленно и могут не учитывать общую стратегию окончательной сборки изделия [7, 8]. В тоже время, во входящей конструкторской документации могут быть также не учтены особенности сборки изделия в целом. Указанные обстоятельства приводят к необходимости повышения эффективности производственных процессов за счет разработки и внедрения, наряду с уже существующими информационными системами, интеллектуальных систем нового типа, способных поддерживать формирование комплексных решений, координирующих действия многих членов производственного коллектива.

Целью статьи является изложение подхода к созданию средств поддержки принятия решений производственным персоналом предприятия авиационного профиля, в форме набора взаимосвязанных типовых элементов, каждый из которых представляет собой экспертную систему. Такой подход дает возможность развертывания единого поля данных и знаний в рамках предприятия, что обеспечивает возможность автоматизации формирования комплексных производственных решений. Показаны возможности интеграции разработанных средств с уже существующими на предприятии информационными системами.

1. Обоснование выбора архитектуры агента для разработки мультиагентной системы поддержки принятия координирующих решений

На начальной стадии разработки мультиагентной системы поддержки принятия решений (МСППР) необходимо определить тип агентов, а также их номенклатуру, исходя из специфики задач, которые будут решаться с помощью МСППР.

Ниже приведены два варианта архитектур самых распространенных агентов: простая реактивная архитектура и архитектура агента типа BDI (Belief-Desire-Intension) [9].

Архитектура реактивного агента, представленная на рис. 1, характеризуется простотой, но в то же время предоставляет большую детерминированность в действиях, т.е. в каждый момент времени можно охарактеризовать поведение агента в зависимости от ситуации. В частности, архитектура простого реактивного агента, способна адекватно описать поведение гибридного автомата, представленного в виде графа переходов [10]. Указанная особенность очень важна, поскольку в качестве математического аппарата для описания процессов формирования координирующих решений в среде МСППР были выбраны именно гибридные автоматы [10].

Архитектура BDI, показанная на рис. 2, сложнее архитектуры простого реактивного агента. Агент типа BDI способен реализовать такие действия как желания, убеждения и предпочтения с помощью соответствующих функциональных блоков, что позволяет довольно тонко регулировать поведение агента, но в тоже время указанная особенность снижает предсказуемость его поведения. Вместе с тем, характер задач, которые призвана решать разрабатываемая МСППР, дает возможность ограничить номенклатуру агентов лишь одним типом – простым реактивным.

Область применения мобильных агентов в основном ограничивается веб-технологиями, а также использованием «персональных помощников» PDA (PersonalDigitalAssistant). Стандарты же FIPA напротив, описывают архитектуру мультиагентной

системы и структуру самого агента, делая в основном упор на реализуемые агентами функции, и таким образом, могут являться основой для синтеза промышленной системы поддержки принятия координирующих решений на машиностроительном предприятии. Кроме того, стандартах FIPA описывается возможность интеграции агентной системы с существующим программным обеспечением, что является важным свойством создаваемой системы.

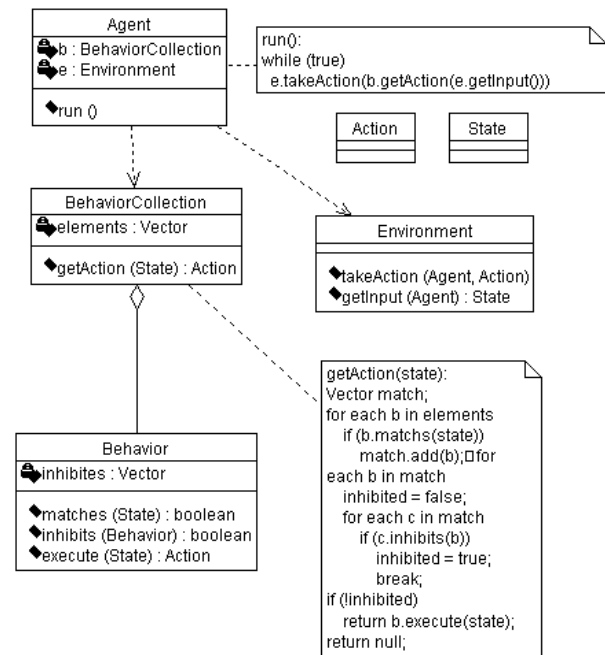


Рис. 1. Архитектура простого реактивного агента

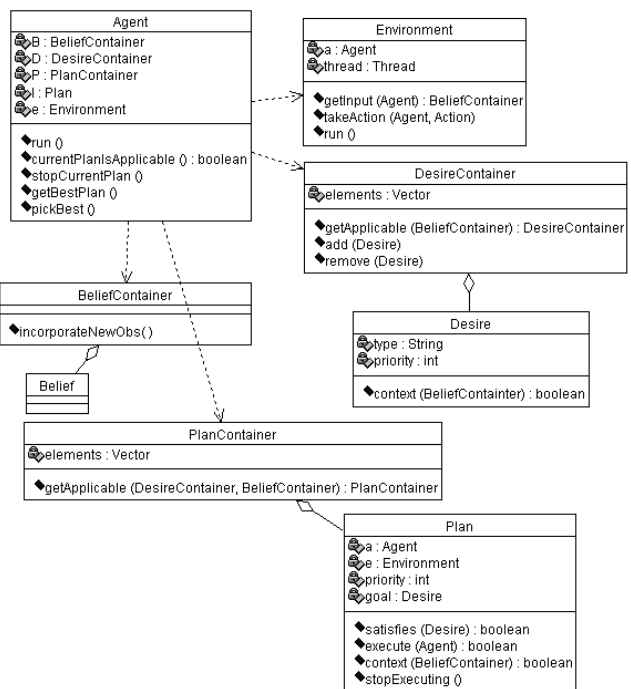


Рис. 2. Архитектура агента типа Belief-Desire-Intension (BDI)

Приведем наиболее значимые сравнительные характеристики агентных платформ по 2 стандартам.

OMG MASIF (Object Management Group):

- управление агентами;
- перенос агентов;
- именованье;
- типы агентных систем;
- учет агентов.

FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents):

- управление агентами (White pages, Yellow pages, Directory facilitator);
- агентная платформа (Name system, Directory, agent management);
- взаимодействие агентов (сообщения, формальная семантика, протоколы);
- интеграция с существующим ПО (ARB, Wrapper, интеграция систем без агентов);
- сервис онтологий (термины, аксиомы, связи, запросы) [11];
- дополнительные типы агентов (промышленные).

Модель агентной платформы согласно стандартам FIPA изображена на рис. 3. Сравнительные характеристики наиболее распространенных агентных платформ приведены ниже в табл. 1.

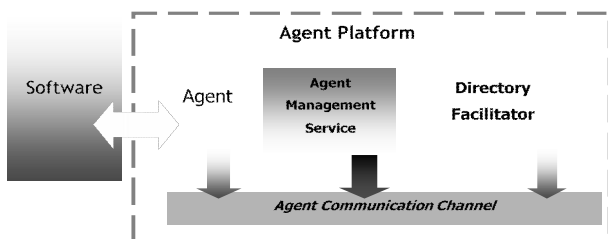


Рис. 3. Модель агентной платформы согласно стандартам FIPA

Таблица 1

Наиболее распространенные агентные платформы

Платформа	Особенности
FIPA OS	Оболочка, поддерживающая основные стандарты FIPA, для создания интеллектуальных агентов. Содержит среду, планировщик задач. Канал сообщений, оболочку для агентов формата JESS. Поддержка RMI, HTTP.
JADE	JavaAgentDevelopmentFramework, позволяющая распределять агентов по вычислительным платформам, удаленно конфигурировать. Допускает размещение агентов на мобильных устройствах.
Grasshopper	Попытка реализовать платформу, поддерживающую оба стандарта (OMG MASIF и FIPA). Используется в основном для исследовательских проектов.
Zeus	Платформа для создания распределенных мультиагентных систем, реализующих коллаборативные принципы работы
JINI	Обеспечивает предоставление базовых сервисов для мобильных агентов, неполноценная агентная платформа
Agent Builder	Коммерческая платформа и средства для разработки интеллектуальных агентов и агентных приложений. Поддерживает стандарт обмена знаниями KQML, а также кросс-платформенное размещение на основе CORBA.
BeeGent	Основана на понятиях «состояние» и «переход». Поддерживает агент-оболочку для интеграции существующего ПО. Совместима со стандартом FIPA. Платная.
Agent Farm	Автономные агенты фреймворка структуры. Платформа использует Java.
Aglets	Открытая разработка фирмы IBM. Основная идея – создание мобильных перемещаемых в рамках Java-окружения интернет-агентов. Использует собственный сервер Tahiti.

Исходя из возможного использования системы в качестве дополнительной (надстройки) к существующей можно сделать вывод о необходимости выбора стандартов FIPA как наиболее подходящего для такого типа систем ввиду возможности интеграции их с уже существующими.

На основании обзора агентных систем были выбраны стандарты FIPA [12] на создание программных агентов, поскольку именно эти стандарты полностью реализуют идеи интеграции МСППР с уже существующими на предприятии информационными системами.

Общая схема интеграции представлена на рис. 4, где коммуникационный канал представлен в виде протокола обмена сообщениями между агентами.

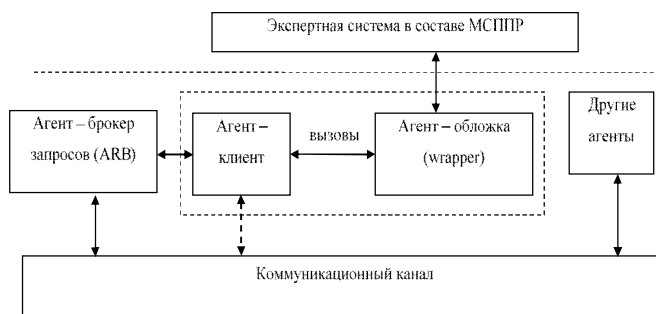


Рис. 4. Схема интеграции МСППР с существующим на предприятии программным обеспечением

При этом агент-брокер используется только при реализации МСППР на основе технологии CORBA, агент-обложка реализован в виде модуля, вызывающего функции программного интерфейса существующего программного обеспечения (например, API САПР ТП «Компас-Вертикаль»), агент-клиент представляет собой типовой блок МСППР (то есть координатор и распознаватель, связанных между собой).

После выбора типа агентной платформы для реализации МСППР, была синтезирована типовая структура блока принятия решений, описываемого гибридным автоматом. Для общения между агентами использован стандартный агентный «язык» KQML [13], но по причине необходимости передачи информации лишь в форме предикатов, для конкретной реализации был выбран формат обмена на основе XML. С его помощью была реализована передача предикатов в создаваемой системе (например, для обмена информацией между координатором и распознавателем).

После представления структуры решающего блока (агента) была синтезирована обобщенная структуратипового фрагмента в составе МСППР.

На рис. 5 показана функциональная схема автоматной реализации МСППР по формированию координирующих решений при технологической подготовке сборочного производства.

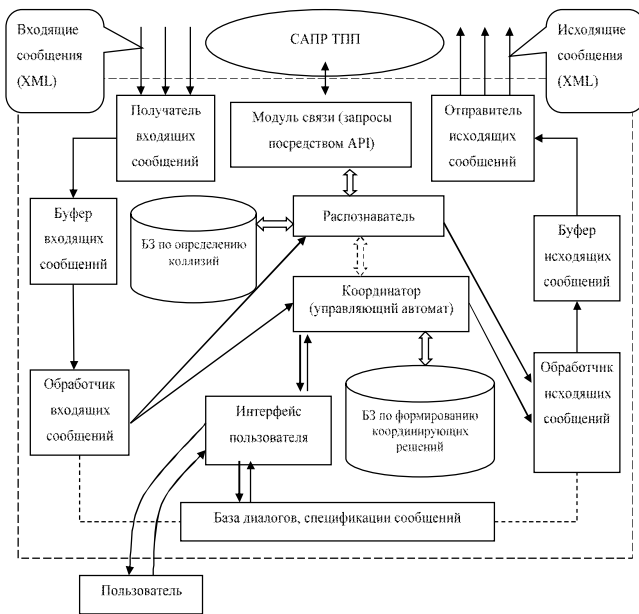


Рис. 5. Функциональная схема автоматной реализации МСППР по формированию координирующих решений

Интеграция МСППР с уже используемым на предприятии программным обеспечением показана на примере пакета «Компас-Автопроект», который

чаще всего используется на отечественных самолетостроительных предприятиях и имеет развитый программный интерфейс, позволяющий получать всю необходимую информация как о технологическом процессе сборки или изготовления детали (вплоть до отдельных переходов), так и о параметрах каждой операции таких технологических процессов. Программный комплекс КОМПАС-Автопроект состоит из двух взаимосвязанных подсистем:

- КОМПАС-Автопроект-Спецификации;
- КОМПАС-Автопроект-Технология.

В первой из названных подсистем концентрируются технологические задачи, связанные с составом изделия, а во второй – с проектированием технологических процессов. Такая схема построения продиктована необходимостью интеграции технологического модуля с PDM-системами – как собственными, так и внешними. Также обеспечивается возможность доступа ко всей информации в системе через развитый программный интерфейс (Application Programming Interface – API).

На рис. 6 изображена диаграмма развертывания МСППР и один из возможных вариантов ее интеграции с существующими компонентами информационной системы цехового уровня.

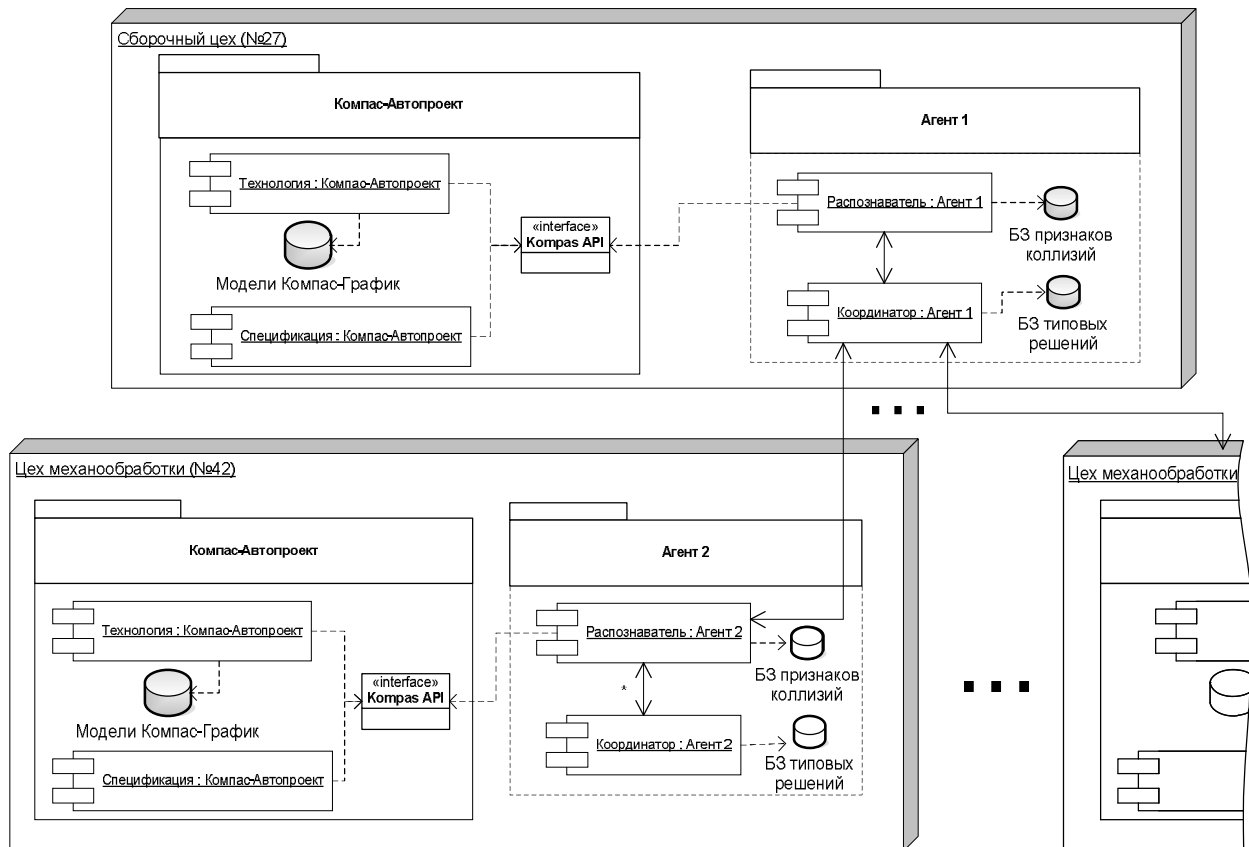


Рис. 6. Место МСППР по формированию координирующих решений при сборке самолетных конструкций в общей структуре АСУ уровня цеха (на примере интеграции с системой «Компас-Автопроект»)

Разработанная МСППР была протестирована на примере формирования документа «Техническое

состояние поставки деталей на сборку» для сборочного цеха самолетостроительного предприятия.

Выводы

1. Описана технология разработки типового фрагмента производственной системы поддержки принятия решений по организации производства на промышленных предприятиях авиационного профиля, которая в отличие от известных производственных систем с искусственным интеллектом, дает возможность, за счет применения мультиагентной технологии, интеграции различных центров принятия решений на предприятии, для формирования комплексных решений по координации производственных процессов. Обоснован выбор архитектуры агентов путем сравнения возможностей простого реактивного агента и агента типа BDI (Belief-Desire-Intension).

2. Показано, что мультиагентная система, состоящая только из простых реактивных агентов, способна поддерживать процессы формирования, в среде СППР, координирующих решений по организации производства.

3. Приведен вариант интеграции МСППР с другими производственными информационными системами на примере пакета прикладных программ «Компас-Автопроект».

Список литературы

1. *Интеллектуальные системы принятия проектных решений [Текст] / А.В. Алексеев, А.Н. Борисов, Э.Р. Вилломс, Н.Н. Слядзь, С.А. Фомин. – Рига: Зинатне, 1997. – 320 с.*
2. *Люгер, Джордж Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения [Текст] : пер. с англ. / Джордж Ф. Люгер. 4-е изд. – М.: Вильямс, 2004. – 864 с.*

3. *Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем [Текст] / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.*

4. *McGuire, J.M. SHADE: Technology for Knowledge-Based Collaborative Engineering [Electronic resource] / J.M. McGuire, D.R. Kuokka, J.C. Weber // Journal of Concurrent Engineering: Applications and Research. – 1993. – v.1 (3) - Access mode: <http://citeseer.ist.psu.edu/mcguire93shade.html>*

5. *Джарратано, Дж. Экспертные системы: принципы разработки и программирование [Текст] / Дж. Джарратано, Г. Райли – М.: Вильямс, 2006. – 1152 с.*

6. *Пазайтис, В.С. Экономико-математическое моделирование производственных систем [Текст] / В.С. Пазайтис, Ю.В. Львов – М.: Высшая шк., 1991. – 191 с.*

7. *Технология сборки самолетов [Текст] / Еришов В.И. [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. – 213 с.*

8. *Технология самолетостроения [Текст] / А.Л. Абибов, Н. М. Бирюков, В. В. Бойцов [и др.] ; под общ. ред. А. Л. Абибова. – М.: Машиностроение, 1970. – 598 с.*

9. *Ландсберг, С.Е. Некоторые аспекты проектирования мультиагентных систем с использованием языка UML [Текст] / С.Е. Ландсберг, А.А. Хованских // Вестник ВГТУ. – Воронеж, 2012. – №9. – С. 4-8.*

10. *Савельев, А.Я. Прикладная теория цифровых автоматов [Текст] / А.Я. Савельев. – М.: Высш. шк., 1987. – 272 с.*

11. *Лапишин В.А. Онтологии в компьютерных системах [Текст] / В.А. Лапишин. – М.: Н. мир, 2010. – 224 с.*

12. *Standard FIPA specifications [Electronic resource] - Access mode: <http://fipa.org/repository/standardspecs.html>.*

13. *Finin, T. KQML as an Agent Communication Language [Text] / T. Finin, Y. Labrou, J. Mayfield // Software Agents. – Forthcoming: MIT Press, 1995. – P. 318 - 326.*

Надійшла до редколегії 31.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Г. Семенов, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

РОЗРОБКА ТИПОВОГО ФРАГМЕНТУ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ КООРДИНУЮЧИХ РІШЕНЬ З ОРГАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА НА ПРОМИСЛОВОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

I.V. Shostak, M.O. Danova, R.B. Capitan

Описана технологія розробки типового фрагменту виробничої системи підтримки прийняття рішень (СППР) з організації виробництва на промислових підприємствах. На відміну від відомих виробничих систем зі штучним інтелектом, дана СППР не тільки реалізована у формі експертної системи, а й допускає, за рахунок застосування мультиагентної технології, можливість інтеграції різних центрів прийняття рішень на підприємстві, для формування комплексних рішень по координації виробничих процесів. Обґрунтовано вибір архітектури агентів шляхом порівняння можливостей простого реактивного агента і агента типу BDI (Belief-Desire-Intension). Показано, що мультиагентна система, що складається тільки з простих реактивних агентів, здатна підтримувати процеси формування, в середовищі СППР, які координують рішень по організації виробництва. Наведено варіант інтеграції мультиагентної СППР з іншими виробничими інформаційними системами на прикладі пакета прикладних програм «Компас-Автопроект».

Ключові слова: промислове підприємство, штучний інтелект, експертна система, мультиагентна технологія, підтримка прийняття рішень, координуючі рішення.

DEVELOPMENT OF A TYPICAL FRAGMENT OF COORDINATING DECISION MAKING SUPPORT MULTIAGENT SYSTEM ON THE ORGANIZATION OF PRODUCTION AT THE INDUSTRIAL ENTERPRISE

I.V. Shostak, M.O. Danova, R.B. Capitan

The technology of development of a standard fragment of the production decision-making support system (DMSS) for the organization of production at the industrial enterprises is described. Unlike the known production systems with an artificial intelligence, this DMSS not only is realized in the form of expert system, but also allows, due to use of multiagent technology, ability to integrate different centers of decision-making at the enterprise, for formation of complex solutions for the coordination of production processes. The choice of architecture of agents by comparing of opportunities of the ordinary reactive agent and the agent like BDI (Belief-Desire-Intension) is reasonable. It is shown that the multiagent system consisting only of ordinary reactive agents is capable to support formation processes, in the environment of DMSS, the coordinating decisions on the organization of production. The option of integration of multiagent DMSS with other production information systems on the example of an application program package of "Kompass-AutoProject" is given.

Keywords: the industrial enterprise, an artificial intelligence, expert system, multiagent technology, the decision-making support coordinating decisions.

Запобігання та ліквідація надзвичайних ситуацій

УДК 355.457

Ю.О. Бабій

Національна академія Державної прикордонної служби України
імені Богдана Хмельницького, Хмельницький

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МОНІТОРИНГУ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ НА СУХОПУТНОМУ КОРДОНІ УКРАЇНИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМИ ЗАСОБАМИ ОХОРОНИ

Автоматичне виявлення рухомого об'єкта на ділянках сухопутного кордону протяжністю більше 15 км на фланг охорони, інваріантність до рельєфу і типу місцевості, необслуговуємість лінійної частини технічних засобів охорони кордону, цілкова маскованість чутливого елемента – всім цим вимогам на сучасному етапі розвитку технічних засобів охорони кордону відповідають тільки волоконно-оптичні засоби охорони. Чутливим елементом лінійної частини засобу здебільшого є розподілений волоконний світловод, що прокладається у ґрунті. Такі засоби знайшли досить широке застосування в охороні трубопроводів, у виявленні їх пошкоджень. Хвилі тиску, що виникають від переміщення правопорушника, на відміну від сейсмічних, мають радіус впливу на світловод до 1 м і є досить слабкими, якщо рухомим об'єктом є людина. Незначний вплив правопорушника на чутливий елемент – світловод обумовлює необхідність підвищення завадостійкості виявлення правопорушника. У даній роботі у ході формалізації процесу моніторингу рухомих об'єктів на сухопутному кордоні України волоконно-оптичними засобами охорони розроблено класифікацію структур волоконно-оптичних датчиків.

Ключові слова: рухомий об'єкт; волоконно-оптичні засоби охорони, технічні засоби охорони кордону.

Вступ

Постановка проблеми. Процес моніторингу рухомого об'єкта (РО) буде більш інформативним за умови визначення напрямку руху правопорушника (ПП), що спростить здійснення процесу вторинного виявлення ПП відеотепловізійними засобами спостереження. Зазначене може бути забезпечено застосуванням двох лінійних чутливих елементів (ЧЕ), прокладених паралельно на відстані декількох метрів, тобто лінійна частина волоконно-оптичних засобів охорони (ВОЗО) трансформується у квазілінійну.

Суттєвим є питання забезпечення живучості ВОЗО та неперервності моніторингу. Визначення місця пошкодження світловода на сучасному етапі розвитку волоконно-оптичної рефлектометрії здійснюється з достатньою точністю, менше 1 м і потребує декількох десятків хвилин. Проте, на місцевості вилучити пошкоджений кабель і здійснити його зварювання можуть лише кваліфіковані спеціалісти, що може зайняти декілька днів. Забезпечити функціонування ВОЗО з пошкодженим ЧЕ можливо при об'єднанні двох лінійних розподілених ЧЕ, трансформації квазілінійної частини ВОЗО у квазілінійну з кільцевим ЧЕ.

Отже, розподіленість топології елементів ВОЗО вимагає приділення уваги завадостійкості і жи-

вучості системи, забезпечення виявлення і визначення напрямку переміщення РО, що прогнозовано вирішується на основі методів волоконно-оптичної рефлектометрії та потребує, у першу чергу, формалізації процесу моніторингу рухомих об'єктів волоконно-оптичними засобами охорони.

Мета статті та постановка завдання. Зважаючи на вищесказане, метою даної роботи є розробка класифікації структур ВОЗО у ході формалізації процесу моніторингу рухомих об'єктів на сухопутному кордоні України ВОЗО.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для розподілених систем охорони, якими є ВОЗО, в значній мірі процес моніторингу РО визначається структурою засобу, однією з основних ознак класифікації якої є тип каналу мультиплексування сигналів ВОЗО, табл. 1.

Результати аналізу запропонованої класифікації структури ВОЗО дозволять у подальшому формалізувати процес моніторингу РО на сухопутному кордоні України при застосуванні раціональної структури ВОЗО та розробити загальні вимоги до неї.

За типом датчиків найбільш інформативними є дискретні датчика, які можуть вимірювати різні фі-

зичні величини, зокрема, волоконно-оптичні гіроскопи є найбільш чутливими датчиками реєстрації сейсмосигналів. Чутливими, стосовно вимірювання сейсмосигналів, є дискретні волоконно-оптичні датчики (ВОД), принцип роботи яких потребує встановлення їх у розрив світловоду, що не дозволяє об'єднувати такі датчики в одному світловоді [1-5].

Таблиця 1

Класифікація структури ВОЗО

Ознака класифікації структури ВОЗО	Розподіл за ознакою
Тип датчика	дискретний
	квазірозподілений (вбудований датчик у світловод)
	розподілений (датчиком є світловод)
Тип зони виявлення	площинна
	лінійна
	квазілінійна (декілька ліній)
Тип каналів мультиплексування сигналів	мультиплексування сигналів розподіленого ЧЕ
	послідовне об'єднання датчиків у ЧЕ
	паралельне об'єднання датчиків у ЧЕ
Принцип вимірювання фізичних величин	аналоговий
	дискретний

Зона виявлення при мультиплексуванні множини таких датчиків у ЧЕ є площинною, рис. 1.

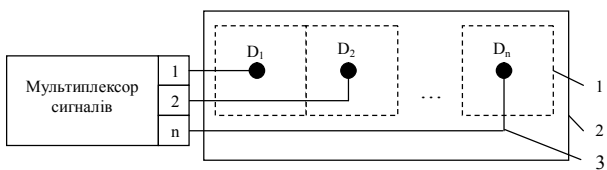


Рис. 1. Моніторинг РО при багатоволоконному мультиплексуванні дискретних датчиків з площинною зоною виявлення: 1 – чутлива зона ВОД; 2 – зона виявлення; 3 – світловоди

Також, топологія, рис. 1, характеризується паралельним збором даних від дискретних датчиків, які принципово не об'єднуються одним світловодом. Такий моніторинг застосовується, наприклад, у геодезії. Щодо ВОЗО, то для моніторингу 20-30 км ділянки кордону даний тип не є перспективним через загальну значну протяжність світловодів, а, отже, і через вартість системи.

Як сигналізаційній системі, ВОЗО достатньо визначення місцеположення точки впливу РО на ЧЕ, а також бажаною функцією є визначення напрямку.

Другий тип моніторингу РО відрізняється від першого застосуванням датчиків, що можуть мультиплексуватися послідовно, шляхом фізичного з'єднання одним світловодом, рис. 2 [6]. Це можуть бути інтерферометричні датчики.

Також датчики, які не потребують здійснення розриву світловоду, наприклад, макровигинні, можуть послідовно об'єднуватися, проте, потребують безпосереднього впливу на них об'єкта [7], що не дозволяє таку топологію системи розглядати як перспективну.

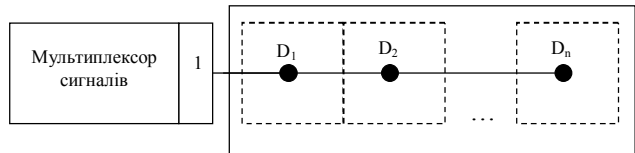


Рис. 2. Моніторинг РО при одноволоконному мультиплексуванні дискретних датчиків з площинною зоною виявлення

Відомий спосіб паралельного об'єднання дискретних відбивних датчиків [8, 9] дозволить забезпечити неперервність вимірювання характеристик у необхідній зоні виявлення за рахунок використання множини чутливих решіткових датчиків, які паралельно приєднують до двох світловодів, рис. 3.

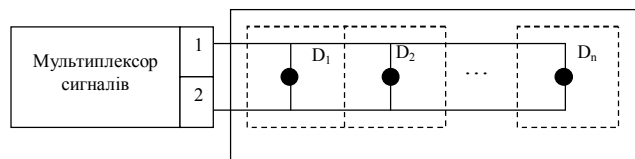


Рис. 3. Моніторинг РО при двоволоконному мультиплексуванні дискретних датчиків з площинною зоною виявлення

В останній час набули широкого розвитку квазірозподілені датчики, які вбудовані безпосередньо в світловод, наприклад, датчики на основі берегівських дифракційних решіток, рис. 4 [10, 11].



Рис. 4. Моніторинг РО дво- і більше волоконному мультиплексуванні квазірозподілених дискретних датчиків з квазілінійною зоною виявлення: 1 – зона виявлення одного ЧЕ; 2 – зона виявлення; 3 – світловоди

Проте, вартість такого типу світловоду досить велика, але він є перспективним, зважаючи на тенденцію зменшення вартості волоконно-оптичних приладів. Крім цього, даний тип вбудованих датчиків має найбільшу чутливість з розподілених ЧЕ.

Як перспективний тип моніторингу з квазілінійною зоною виявлення, слід також вважати і із застосуванням розподілених датчиків, що представляють звичайний світловод, а корисний сигнал виділяється на основі імпульсно-часової рефлектометрії і, зокрема, фазочутливої її різновидності, рис. 5 [12, 13].

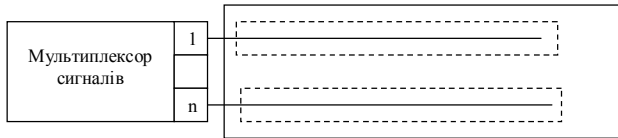


Рис. 5. Моніторинг РО при двоволоконному мультиплексуванні розподілених дискретних датчиків з квазілінійною зоною виявлення

Подамо загальні вимоги до структури ВОЗО: протяжність флангу охорони не менше 10 км; інваріантність ЧЕ до типу місцевості; забезпечення функцій моніторингу як виявлення, виявлення місцеположення РО (дальності до РО і напрямку руху «від нас» або «до нас»); застосування квазірозподілених (вбудованих) або розподілених датчиків у вигляді світловоду; застосування ЧЕ у вигляді петлі (кільця); забезпечення функціонування при пошкодженні світловоду.

ВОЗО має бути з розподіленням ЧЕ з мінімальною шириною на основі світловодів як датчиків. Світловод як датчик використовується із застосуванням брегівських дифракційних решіток, інтерферометрів Маха-Цендера або Фабрі-Перо, двомодового інтерферометра, фазочутливого рефлектометра. Вони чутливі, проте, механічні коливання ґрунту від людини в змозі реєструватися лише при безпосередньому

впливі об'єкта на світловод. Це вимагає розробки додаткових методів підвищення завадостійкості.

Перспективним типом моніторингу РО є такий, при якому застосовується двоволоконне мультиплексування розподіленого датчика з квазілінійною зоною виявлення у вигляді петлі. Квазілінійний тип системи може складатися зі світловоду, який прокладається у вигляді петлі паралельно у ґрунті. Обробка інформації повинна здійснюватися на основі фазочутливої імпульсно-часової рефлектометрії. При вигині світловода виникає інтерференція імпульсів релєєвського розсіяння від різних ділянок місця впливу на волокно об'єктом. Рефлектометр визначає дальність до місця впливу з точністю до 5 м. Сигнал на виході рефлектометра змінюється при виникненні фазової модуляції. Для того, щоб оцінити залежність між зміною сигналу і місцем модуляції, використовують вираз контрасту інтерференційної картини V [10]:

$$V = \sqrt{1 - \left(\frac{ct - 2z_0}{\Delta z} \right)^2},$$

де t – час розповсюдження світлової хвилі; c – швидкість розповсюдження світлової хвилі; z_0 – координата точки впливу на світловод; Δz – роздільна здатність рефлектометра.

Перспективну структуру моніторингу рухомих об'єктів на сухопутному кордоні України ВОЗО подано на рис. 6.

Виявлення здійснюється на основі волоконно-оптичної рефлектометрії. Через 1-2 с ПП переміститься з точки А в Б і наступить на друге плече петлі світловода. В результаті є можливість прогнозувати напрям його руху, рис. 6.

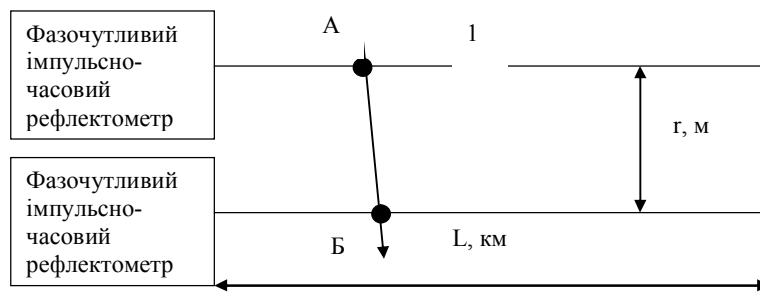


Рис. 6. Структура моніторингу рухомих об'єктів на сухопутному кордоні України ВОЗО: 1 – розподілений ЧЕ, світловод

Висновки й перспективи подальших досліджень

У ході формалізації процесу моніторингу рухомих об'єктів на сухопутному кордоні України волоконно-оптичними засобами охорони розроблено класифікацію структур ВОЗО та встановлено, що доцільним є моніторинг РО при одноволоконному мультиплексуванні розподілених датчи-

ків з кільцевою зоною виявлення. Також в роботі визначено загальні вимоги до ВОЗО сухопутного кордону.

Для реалізації такої структури необхідно визначитись з функціональною структурою ВОЗО підвищеної завадостійкості та живучості, а також розробити методика підвищення завадостійкості процесу моніторингу, що є перспективою подальших досліджень.

Список літератури

1. Бутусов М.М. Волоконная оптика и приборостроение // М.М. Бутусов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы: Сб. ст. / Под ред. С.А. Дмитриева, И.И. Слепова. – М.: Спектр, 2000. – 276 с.
3. Удда Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда / Перевод с англ. И. Ю. Шкадиной. – М.: Техносфера, 2008. – 518 с.
4. Алексеев А.Э. Волоконная интерферометрия рассеянного излучения и ее применение для регистрации акустических воздействий: дис. ... к-та физ.-мат. наук: 01.04.03 / Алексеев Алексей Эдуардович. – Москва, 2014. – 282 с.
5. Лисий М.І. Формалізація синтезу структури підсистеми виявлення волоконно-оптичного типу / М.І. Лисий // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 3. – С. 110-113.
6. Куликов А.В. Волоконные акустооптические антенны и их применение / А.В. Куликов. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 42 с.
7. Дышлюк А.В. Принципы создания оптоэлектронных информационно-измерительных систем мониторинга безопасности эксплуатации техногенных объектов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.11.16 / Дышлюк Антон Владимирович. – Владивосток, 2006. – 174 с.
8. Патент UA 64924, МПК G08B 13/186. Спосіб побудови структури волоконно-оптичного засобу охорони об'єктів / Лисий М.І.; власник Нац. акад. Держ. прикордон. служби України. – № и 200311203; заявл. 10.10.03; опубл. 15.03.2004.
9. Патент. UA 77449, МПК G08B 13/18, G001V 1/28. Спосіб реєстрації сейсмічного сигналу волоконно-

оптичним датчиком / Лисий М.І., Шинкарук О.М.; власник Нац. акад. Держ. прикордон. служби України. – № 20040503300; заявл. 05.05.2004; опубл. 15.12.2006.

10. Одноволоконные распределенные волоконно-оптические датчики физических величин и полей / А.М. Мамедов, В.Т. Потапов, Т.В. Потапов, Е.К. Смуреєв // Фотон-Экспрес / под ред. А. Г. Свинцова. – М.: Экон Информ, 2005. – № 6. – С. 141-151.

11. Патент 2377497 Российская Федерация МПК G01B11/16 Устройство для измерения деформаций на основе квазираспределенных волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках / Барышников Н.В., Тихомиров С.В., Митюрєв А.К., Карасик В.Е., Пнев А.Б., Лазарев В.А.; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений" (ФГУП "ВНИИО-ФИ"); заявл. 15.07.2008; опубл. 21.12.2009.

12. Охрана периметра объектов большой протяженности RaySense [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.klaster-plus.ua/novosti-i-sobytiya/ohrana-perimetra-obektov-bolshoy-protyazhennosti-raysense/>. – Назва з екрана.

13. Когерентный фазочувствительный рефлектометр с амплитудно-фазовой модуляцией зондирующих импульсов / А.Э. Алексеев, В.С. Вдовенко, Б.Г. Гориков, В.Т. Потапов, Д.Е. Симикин // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 2. – С. 41-49.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СУХОПУТНОЙ ГРАНИЦЕ УКРАИНЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ ОХРАНЫ

Ю.А. Бабий

Аннотация: Автоматическое обнаружение движущегося объекта на участках сухопутной границы протяженностью более 15 км на фланг охраны, инвариантность к рельефу и типа местности, необслуживаемость линейной части технических средств охраны границы, полная маскированность чувствительного элемента, всем этим требованиям на современном этапе развития технических средств охраны границы соответствуют только волоконно-оптические средства охраны. Чувствительным элементом линейной части средства в основном являются распределенный волоконный световод, что прокладывается в почве. Такие средства нашли довольно широкое применение в охране трубопроводов, в выявлении их повреждений. Волны давления, возникающих от перемещения правонарушителя, в отличие от сейсмических, имеют радиус воздействия на световод до 1 м и довольно слабы, если подвижным объектом является человек. Незначительное влияние правонарушителя на чувствительный элемент - световод обуславливает необходимость повышения помехоустойчивости обнаружения правонарушителя. В данной работе в ходе формализации процесса мониторинга подвижных объектов на сухопутной границе Украины волоконно-оптическими средствами охраны разработана классификация структур волоконно-оптических датчиков.

Ключевые слова: движущийся объект; волоконно-оптические средства охраны, технические средства охраны границы.

FORMALIZATION OF MONITORING OF MOBILE OBJECTS ON LAND BORDERS UKRAINE FIBER OPTIC MEANS OF PROTECTION

Yu.O. Babiy

Abstract: Automatically detect moving objects on land border areas stretching over 15 km flank protection, invariance to terrain type and terrain neobsluhovuyemist linear part of means border, the entire maskovanist sensor - all of these requirements at the present stage of technical means of border only the fiber-optic means of protection correspond to it. Sensitive element of the linear product are mostly distributed optic fiber that is laid in the soil. Such tools found quite widely used in the protection of pipelines, in the detection of lesions. Waves pressure arising from the movement of the offender, unlike seismic have influence on the fiber radius up to 1 m and is very weak, if a moving object is a human. Little impact on the offender sensing element - fiber necessitates improve noise immunity identifying the offender. In this paper during the formalization process monitoring moving objects on the land border Ukraine fiber-optical protection classification of structures of fiber-optic sensors.

Keywords: moving object; fiber-optical means of protection, technical means of guarding the border.

УДК 628.317.42

В.А. Глива¹, К.Д. Ніколаєв¹, В.П. Колумбет², Л.О. Левченко²¹Національний авіаційний університет, Київ²Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В УМОВАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ

Розроблено методику і досліджено спектральний склад низькочастотного магнітного поля на території сучасних промислових підприємств. Зареєстровані низькочастотні коливання стаціонарного магнітного поля та наявність гармонік та інтергармонік магнітного поля промислової частоти. Визначено необхідність підвищення роздільної здатності обладнання для розрахунку інтегрального навантаження на довкілля.

Ключові слова: електромагнітне поле, електромагнітна безпека, частота, спектр.

Вступ

Постановка проблеми. В останні роки багато уваги приділяється проблемам електромагнітної безпеки та електромагнітної екології. Це пов'язане з розвитком силових електричних мереж та засобів бездротового зв'язку. Тобто, досліджуються рівні електричних та магнітних полів промислової частоти та електромагнітних випромінювань частот мобільного зв'язку. Але різноманітність джерел електромагнітних полів, наприклад, електричного транспорту спричиняє появу у виробничому та навколишньому середовищі електромагнітних полів непередбачуваних частот, формуючи своєрідний електромагнітний шум. Фактичні рівні та критичність таких полів практично не досліджувалися. Особливої актуальності такі дослідження набувають в умовах зміни парку електричного та електронного обладнання, що обумовлене впровадженням сучасних технологій промислового виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У більшості публікацій стосовно магнітних та електричних полів частот, нижчих за промислову, розглядаються електромагнітні поля, генеровані електричним транспортом різного призначення і конструкцій [1, 2]. Але ці роботи фактично обмежуються констатацією наявності проблеми та критеріями її оцінювання. При цьому оцінювання рівнів магнітних полів відбувається за коливаннями постійного магнітного поля внаслідок руху електричного транспорту. Як показано у [3], такі коливання суттєві, особливо внаслідок руху трамваїв, через використання одного контактного дроту. Це ж спостерігається і у метрополітені. Як показано нами у попередній роботі [4], виміри фактичних рівнів магнітних полів дуже різняться, що не можна пояснити виключно похибкою вимірювань.

До того ж зміни електромагнітної обстановки швидкоплинні, що ускладнює реєстрацію напруженостей полів у режимі реального часу. Такі дані

потрібні для розроблення адекватних засобів захисту, які на сьогоднішній день обмежуються або екрануванням зовнішніх електромагнітних полів [5] або оптимізацією конструкцій підвісів повітряних ліній електропередачі [6].

Мета роботи – розробити засади визначення частотно-амплітудних характеристик низькочастотного електромагнітного фону внаслідок впливу новітніх джерел електромагнітних полів та сформувавши підходи до мінімізації його впливу на людей у виробничих та побутових приміщеннях.

Виклад основного матеріалу

Вимірювання рівнів магнітних полів промислової частоти та стаціонарного (геомагнітного) магнітного поля у м. Києві показали їх суттєві рівні. Так, магнітні поля промислової частоти на територіях житлової будови та підприємств 0,15 -1,75 мкТл. А стаціонарні магнітні поля – 17 – 210 мкТл.

Для цього використано підхід, запропонований у раніше виконаній роботі [7] з пристосуванням його для визначення амплітудно-частотних характеристик магнітного поля частотою 0-500 Гц. Такий діапазон обов'язковий для реєстрації перших двох поширених гармонік промислової частоти, кратних трьом. Ці гармоніки виникають через нерівномірні навантажень на окремі фази трифазної силової електричної мережі та наявність значної (більше 20%) частки електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками.

Вимірювання здійснювалися наступним чином. До лінійного входу персонального комп'ютера підключався ферорезонансний датчик магнітного поля з відомими калібровочними показниками і лінійною залежністю чутливості у діапазоні до 1000 Гц. Комп'ютер був оснащений програмою аналізу частотного спектра Spectrogram.

Чутливість звукової карти комп'ютера складає 10-15 мкВ, що дозволяє гарантовано реєструвати змінні магнітні поля напруженостями порядку

10^{-9} Гл. Перерахунок даних з логарифмічних одиниць у одиниці вимірювання індукції магнітного поля здійснювалися, виходячи з робочої напруги звукової карти та напруги на контактах датчика.

Приклад отриманого спектра магнітного поля наведено на рис. 1. Аналогічні вимірювання проведено на території промислового підприємства з великою кількістю електротехнічного обладнання (рис. 2).

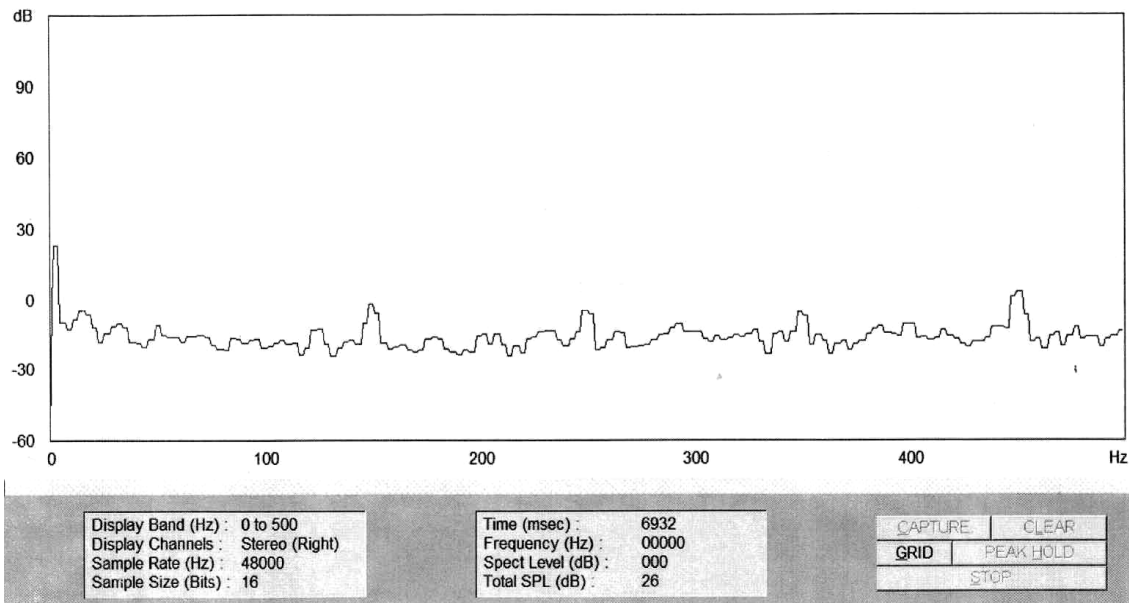


Рис. 1. Спектр магнітного поля на території житлової забудови

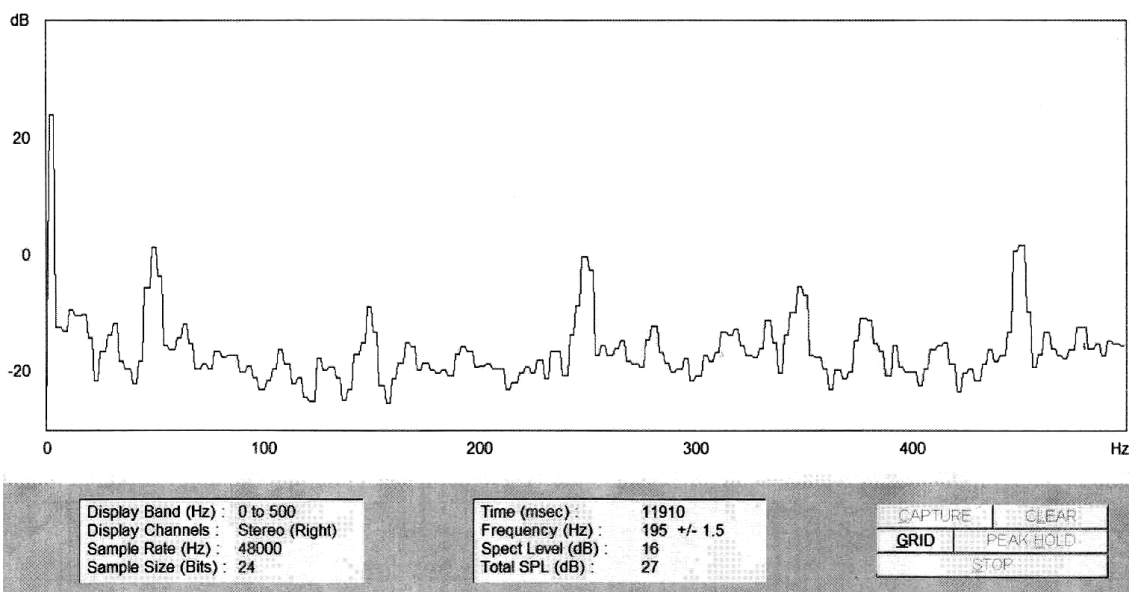


Рис. 2. Спектр магнітного поля на території промислового підприємства

Аналіз отриманих результатів свідчить, що навіть на великих відстанях від джерел магнітних полів на території міста спостерігається складний спектр магнітного поля. За очікуваних значних рівнів третьої гармоніки промислової частоти, аномально високою є шоста гармоніка, походження якої потребує з'ясування.

Найбільший інтерес представляють наявність канонічних інтергармонік промислової частоти 25, 75, 125 Гц. Вони свідчать про наявність нештатних процесів у силових електромережах.

Це може бути наслідком незадовільної якості електроенергії та наявності великої кількості електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками, що притаманне сучасному обладнанню.

Запропонований метод визначення спектрального складу низькочастотного магнітного поля має суттєву перевагу. Розглядаючи спектри на рисунках 1 і 2 можна помітити, що в обох випадках спостерігаються високі значення магнітного поля частотою, близькою до нуля. Порівняння цих даних з вимірюваннями виконаними за допомогою магнітометра

МТМ – 01, призначеного для визначення напруженостей стаціонарних магнітних полів, довели, що зміни висот цих піків відповідають коливанням значень постійного магнітного поля. Тобто фактично геомагнітного поля в умовах його техногенного спотворення. Одночасне вимірювання значень низькочастотного електромагнітного поля та зміни стаціонарного магнітного поля серійними приладами неможливе. Але слід врахувати, що у загальному випадку наш пристрій непристосований до реєстрації магнітного поля нульової частоти. Тобто фактично стаціонарність геомагнітного поля, принаймні у зонах можливих техногенних впливів, дуже відносна і його слід вважати квазістаціонарним.

Але у запропонованих методи та методики є недоліки. Отримані дані достатні для пошуку джерел магнітних полів, але з'ясувати інтегральне електромагнітне навантаження на середовище досить складно через малу роздільну здатність обладнання. Для проведення таких робіт потрібно отримати «тонкий» спектр магнітного поля, що дозволить з обраним кроком прорахувати загальне навантаження відносно гранично допустимих рівнів для кожної частоти. Потребує з'ясування необхідність та достатність засобів захисту з урахуванням амплітуди екранованого поля.

Отримані дані також свідчать, що у разі потреби екранування такого магнітного поля захисна поверхня повинна мати потрібні коефіцієнти екрану-

вання в усій частотній смузі або принаймні для найбільш критичних частот.

Наведені результати стосуються рівнів електромагнітних полів за межами виробничих будівель та споруд, але з точки зору охорони праці такі поля є факторами зовнішніх впливів на електромагнітну обстановку у виробничому середовищі. Такі дані є обов'язковими для формування комплексу заходів з охорони праці електромагнітної безпеки.

Досвід проведення досліджень з електромагнітної безпеки працюючих свідчить, що визначення напруженості електричного або магнітного поля у визначеному діапазоні як інтегрального показника не дає змоги розробити та застосувати відповідні заходи захисту. Але такий підхід використовується для визначення рівнів електромагнітних полів персональних комп'ютерів (фіксовані смуги частот 5 Гц – 2000 Гц, 2 кГц – 400 кГц). Для низькочастотної смуги 5 Гц – 2000 Гц гранично допустимі рівні складають електричне поле 25 В/м, магнітне поле 250 нТл. Однак визначення спектрів цих полів у наведеному діапазоні свідчить, що існують переважні частоти, поля яких дають найбільш суттєвий внесок у сумарне поле.

На рис. 3 наведено приклад спектрального складу електричного поля на робочому місці, оснащеному сучасним стаціонарним персональним комп'ютером, отриманого за допомогою повіреного спектроаналізатора Spectran NF 5030..

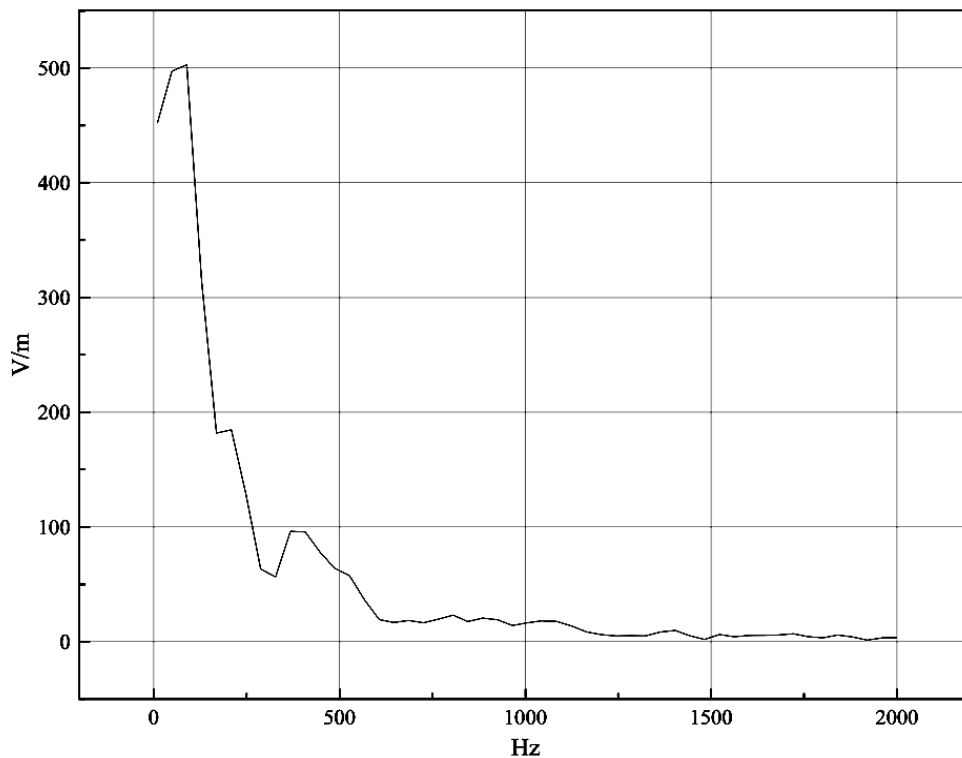


Рис. 3. Спектр електричного поля на робочому місці користувача персонального комп'ютера

Розглядаючи наведений спектр можна дійти висновку, що основний внесок у сумарне електрич-

не поле дають поля промислової частоти та її третьої та дев'ятої гармонік. Як показано нами у роботі

[7], такі поля є наслідком нештатних процесів у системах електроживлення будівель (перенос фаз або велика кількість електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками). Тобто, сама комп'ютерна техніка не має відношення до перевищення гранично допустимих рівнів полів.

Звичайно, сам персональний комп'ютер є нелінійним електро-споживачем і впливає на синусоїда-

льність напруги живлення та появу некомпенсованих електричних струмів частот гармонік промислової частоти, кратних трьом, у нульових робочих провідниках трифазної силової мережі. Але засоби уникнення такого явища не мають відношення до захисту працівника безпосередньо на робочому місці.

Аналогічна картина спостерігається для магнітної складової магнітного поля (рис. 4).

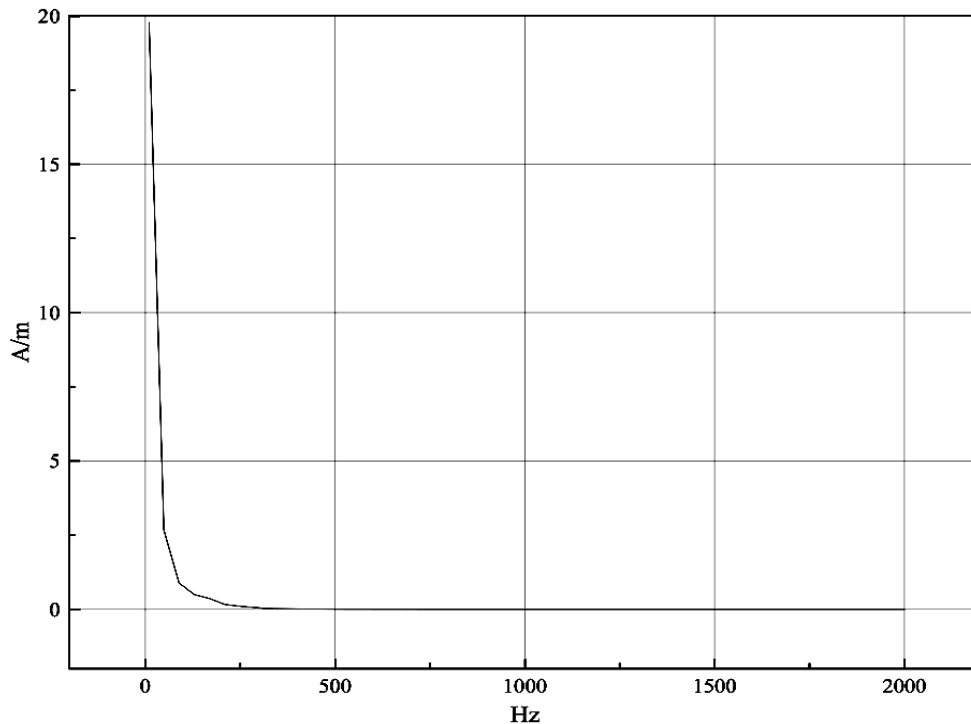


Рис. 4. Спектр магнітного поля на робочому місці користувача персонального комп'ютера

Як видно з рис. 4, суттєвими є частоти 50 та 150 Гц. А зростання напруженості магнітного поля на частотах, близьких до нуля, свідчить про реєстрацію приладом геомагнітного поля. Реєстрація спектрального складу електромагнітного поля дозволяє

визначити частотну залежність ефективності засобів захисту, зокрема електромагнітних екранів.

На рис. 5 наведено спектр магнітного поля стабілізатора живлення перед і за магнітними екраном.

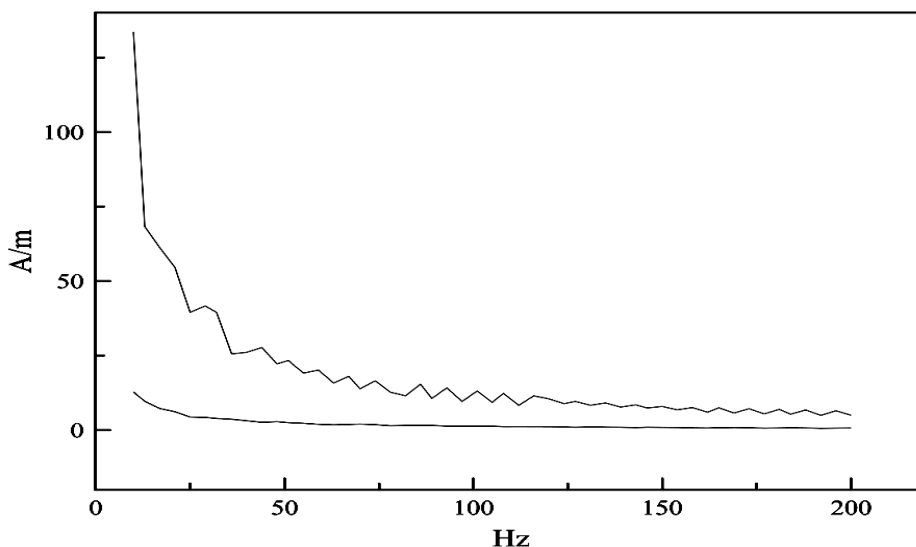


Рис. 5. Частотна залежність ефективності магнітного екрана: верхня крива – вихідне магнітне поле, нижня – екрановане магнітне поле

У наведеному випадку в якості магнітного екрана використовувався тонкий шар магнітних наночастинок розмірами не більше 10 нм.

Це шар стримувався осадженням частинок на поверхню з розчину.

Отримані результати свідчать, що сучасне технологічне обладнання, поряд з низкою переваг – висока ефективність, низьке енергоспоживання, тощо може мати несприятливий вплив на електромагнітну обстановку як у виробничому середовищі, так і на територіях підприємств у цілому. Це пояснюється широкою електромагнітним спектра, який генерується технологічним електричним та електронним обладнанням, засобами бездротового зв'язку, електричним транспортом тощо. У таких умовах ефективним методом дослідження фактичних рівнів електромагнітних полів є отримання їх спектрів та визначення критичності рівня поля на кожній з частот. Це надасть змогу не тільки ідентифікувати джерела електричних та магнітних полів, а й визначити адекватні засоби і заходи з їх нормалізації.

Висновки

1. Розроблені метод і методика реєстрацій спектра низькочастотного магнітного поля промислової частоти, його гармонік та інтергармонік, а також оцінений рівень електромагнітного поля в умовах його техногенних спотворень. Такий підхід дозволяє ідентифікувати джерела магнітного поля з визначенням критичності їх внеску у загальну електромагнітну обстановку.

2. Для коректного визначення інтегрального електромагнітного навантаження на виробниче середовище (довкілля) за нормативними вимогами потрібне отримання відповідного спектра з більш високою роздільною здатністю.

3. Виконання таких робіт є обов'язковим для коректного визначення електромагнітного навантаження на виробниче середовище і розроблення ефективних заходів з охорони праці.

Список літератури

1. *Электромагнитная безопасность транспортных систем: основные источники и параметры магнитных полей / Н.Г.Птицына, Ю.А.Копытенко, В.С.Исмаилов, А.Г.Коробейников // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2. – С. 65 - 71.*
2. *Лелюхин А.М. Разработка методов оценки электромагнитных полей на объектах транспорта: дис... канд. техн. наук: 05.22.01/ Лелюхин Антон Михайлович. – М., 2010. – 198 с.*
3. *Никифорок О.І. До питання дії ослаблення геомагнітного поля на транспортних засобах / О.І. Никифорок, Л.О. Левченко// Гігієна населених місць. – 2014. – Вип..63 – С. 168 - 17.*
4. *Глива В.А. Електричний транспорт як фактор електромагнітного забруднення міста / В.А. Глива, В.О. Панова, В.О. Кружилко // Екологічна безпека та природокористування. – 2015. – Вип.. 19 – С.13 - 18.*
5. *Глива В.А. Просторові критерії екранування низькочастотних магнітних полів / В.А. Глива, Л.О. Левченко, Т.М. Перельот // Управління розвитком складних систем. – 2015. – Вип. 22. – С. 128- 133.*
6. *Метод синтезу замкнених систем активного екранування магнітного поля повітряних ліній електропередачі / Б.І. Кузнецов, А.М. Туренко, Т.Б. Нікітіна та ін. // Технічна електродинаміка. – 2016. –№ 4. – С.8-10.*
7. *Глива В.А. Джерела гармонік магнітного поля у будівлях і спорудах та мінімізація їх рівнів / В.А. Глива, В.Г. Здановський, Л.О. Левченко, Т.М. Перельот // Проблеми охорони праці в Україні. – 2015. – Вип..29 – С. 48 - 58.*

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

В.А. Глива, К.Д. Николаев, В.П. Колумбет, Л.А. Левченко

Разработана методика и исследован спектральный состав низкочастотного магнитного поля на территории современных промышленных предприятий. Зарегистрированы низкочастотные колебания стационарного магнитного поля и наличие гармоник и интергармоник магнитного поля промышленной частоты. Определена необходимость повышения разрешающей способности оборудования для расчета интегральной электромагнитной нагрузки на окружающую среду.

Ключевые слова: электромагнитное поле, электромагнитная безопасность, частота, спектр.

METHODOLOGY OF INVESTIGATION OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS IN CONDITIONS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES

V.A. Glyva, K.D. Nikolaev, V.P. Kolumbet, L.O. Levchenko

The technique has been developed and the spectral composition of the low-frequency magnetic field in the territory of modern industrial enterprises was investigated. Low-frequency oscillations of the stationary magnetic field and the presence of harmonics and interharmonics of the magnetic field of the industrial frequency were registered. The necessity of increasing the resolving power of the equipment for calculating the integrated electromagnetic load on the environment is determined.

Keywords: electromagnetic field, electromagnetic safety, frequency, spectrum.

УДК 656.08 : 656.073.436

О.І. Запорожець¹, І.В. Ковалець², М.Д. Кацман³¹ Національний авіаційний університет, Київ² Інститут математичних машин і систем Національної академії наук України, Київ³ Головне управління охорони українських залізниць, Київ

ОЦІНЮВАННЯ НАСЛІДКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ З НЕБЕЗПЕЧНИМИ ВАНТАЖАМИ

В роботі розглядається стан перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом України, динаміка транспортних подій при перевезенні небезпечних вантажів. Запропонована методика оцінювання часової залежності інтенсивності викиду легкозаймистої речовини, яка була інтегрована у сучасну модель атмосферного перенесення небезпечних речовин. Проведено розрахунок зон уражень внаслідок аварійного викиду бензину АІ-95, що дало змогу врахувати часову мінливість джерела викиду та розрахувати часові залежності концентрації бензину в атмосфері на різних відстанях від аварійної залізничної цистерни.

Ключові слова: залізничний транспорт, небезпечний вантаж, транспортна подія, аварійна ситуація, концентрація небезпечної речовини, математична модель.

Аналіз стану перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом

Порушення умов перевізного процесу, спричинене аварійною ситуацією рухомого складу з небезпечними наслідками, викликає появу екологічно небезпечної залізничної аварійної ситуації з пасажирськими або вантажними поїздами, переводить залізничний транспорт у новаційний стан з новими не приаманними залізничному транспорту властивостям.

Динаміка кількості транспортних подій у відношенні до обсягів перевезень за 1996-2014 рр. подана на рис. 1, який засвідчує, що кількість транспортних подій знижується відповідно до зменшення обсягів вантажних перевезень.

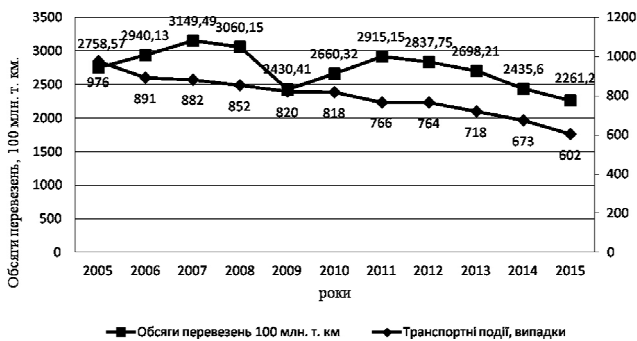


Рис. 1. Динаміка кількості транспортних подій у відношенні до обсягів перевезень за 2005-2015 рр.

На рис. 2 надана динаміка кількості транспортних подій щодо величин балансових збитків від цих подій. З рис. 2 видно, що балансові збитки були найбільшими у 2005р. – 2999 млн. грн., 2007р. – 11,601 млн. грн., 2009р. – 2,534 млн. грн., 2014 – 6,025 млн. грн., та у 2016 р. – 24,649 млн. грн., тобто при зменшенні числа транспортних подій їхніх наслідки мали більш негативний характер впливу на навколи-

шнє середовище і залізничну інфраструктуру, для ліквідування цих наслідків яких необхідно було використовувати велику кількість сил і засобів при більших термінах часу на відновлення нормального руху поїздів.

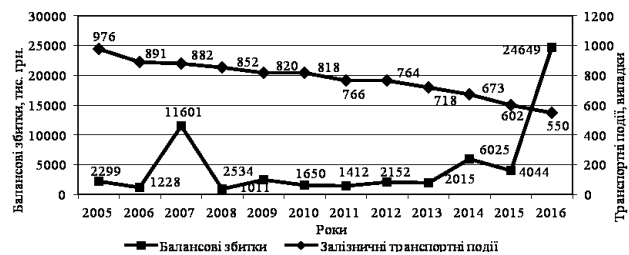


Рис. 2. Динаміка кількості залізничних транспортних подій щодо величин балансових збитків від них

На рис. 3 наведена динаміка вантажних перевезень, у тому числі й небезпечних, за період з 2005р. по 2016 р. Рис. 3 засвідчує, що за період з 2005 р. по 2011 р. частка небезпечних вантажів із загальної кількості вантажних перевезень становила у межах від 7,1% (2005р.) до 8,6 % (2008р.). З 2012 р. намітилася тенденція до зменшення об'ємів вантажних перевезень, так частка небезпечних вантажів від усієї кількості вантажних перевезень становила: 2012 р. – 6,8%, 2013 р. – 6,3%, 2014 р. – 4%, 2015 р. – 3,6%, 2016 р. – 3,5%.

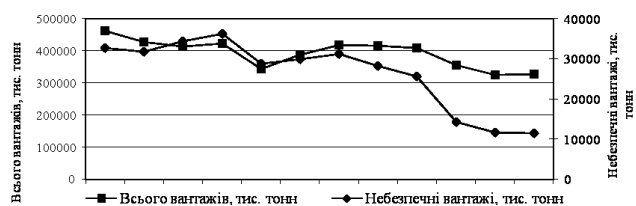


Рис. 3. Динаміка вантажних перевезень за період з 2005р. по 2016 р.

Аналіз транспортних подій при транспортуванні небезпечних вантажів залізничним транспортом

Аналіз залізничних транспортних подій з небезпечними вантажами за період з 2005 р. по 2016 р. подані на рис. 4, з якого видно, що найбільша кількість транспортних подій з небезпечними вантажами припадає на 2007р. (80 випадків) та на 2009р. (79 випадків), а найменша кількість – на 2015р. (14 випадків).

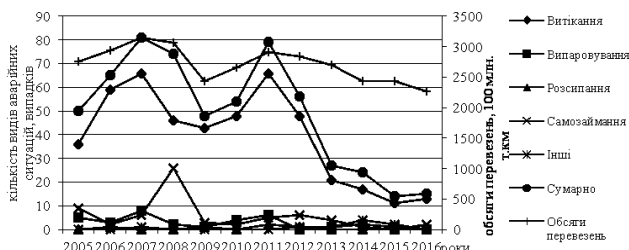


Рис. 4. Динаміка кількості транспортних подій з небезпечними вантажами

Відносна кількість транспортних подій за тяжкістю їх наслідків подана на рис. 5. Діаграма (рис. 5) свідчить про те, що найбільшу частку транспортних подій складають інциденти з небезпечними вантажами (84%), на серйозні інциденти припадає 14%, а на катастрофи – 2%.

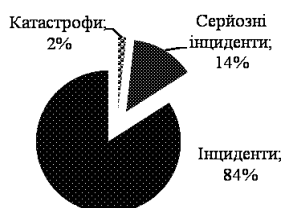


Рис. 5. Відносна кількість транспортних подій за тяжкістю їх наслідків у 2005 – 2016 рр.

Кількість аварійних ситуацій за їх наслідками стосовно стану небезпечного вантажу надана на рис. 6, з якого видно, що найбільша кількість наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами припадає на витікання вантажів із залізничних цистерн (474 випадки або 80,7%). Із самозайманням вантажів пов'язані 66 випадків (11,2%), на випаровування вантажів припадає 5,6% (33 випадки), 5 випадків (майже 1%) пов'язані із розсипанням вантажів, до інших наслідків належать 9 випадків (1,5%).

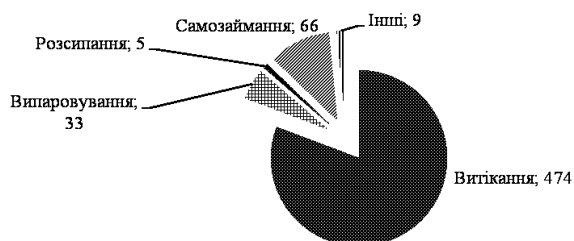


Рис. 6. Кількість аварійних ситуацій за їх наслідками стосовно стану небезпечного вантажу

Витікання небезпечних вантажів, більшість з яких становлять нафтопродукти, характеризується значним шкідливим впливом на довкілля. Цей вплив пов'язаний з токсичністю вуглеводнів і домішок як у рідкому, так й у пароподібному стані, а також з токсичністю деяких продуктів згоряння нафтового палива.

В роботі, на основі статистичних даних результатів вантажних перевезень небезпечних вантажів залізничним транспортом України, побудовані графіки транспортування таких вантажів за період з 2005 по 2016 р. (рис. 7).

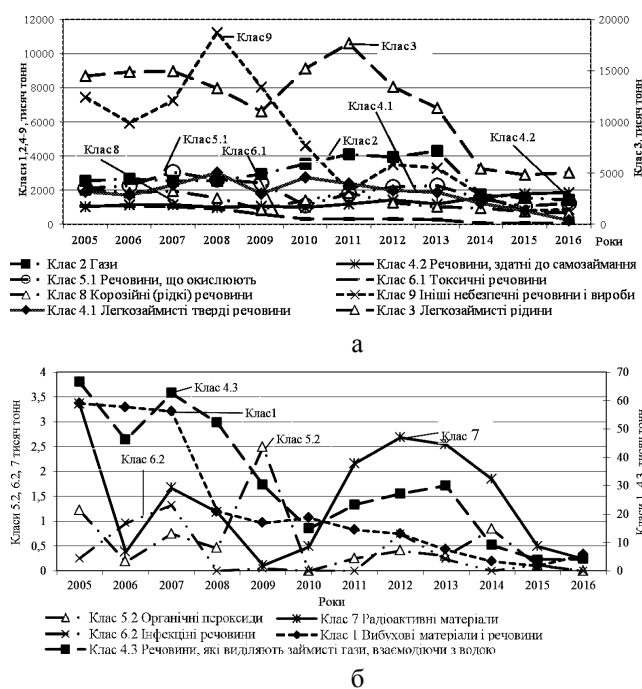


Рис. 7. Динаміка транспортування небезпечних вантажів залізничним транспортом за період з 2005 по 2016 рр.

На рис 7, а подана динаміка транспортування вантажів залізничним транспортом класів 2,3,4.1,4.2, 5.1,6.1, 8 та 9, а на рис. 7б – класів 1, 4.3, 5.2, 6.2 та 7. Відносна кількість вантажів різних класів небезпеки, транспортування яких залізничним транспортом України здійснювалося у період 2005 – 2016 рр., становить : клас 1 – 0,09%, клас 2 – 11%, клас 3 – 45%, клас 4.1 – 7 %, клас 4.2 – 5%, клас 4.3 – 0,12%, клас 5.1 – 7%, клас 5.2 – 0,002%, клас 6.1 – 2%, клас 6.2 – 0,001%, клас 7 – 0,005%, клас 8 – 5%, клас 9 – 18%.

Клас 3 небезпечних вантажів складається з легкозаймистих рідин, рідких десенсибілізованих вибухових речовин та рідин, що надаються до перевезення за температури не нижче температури їх спалаху, а також речовини, що надаються до перевезення або перевозяться у рідкому стані за підвищеної температури та які виділяють займисту пару за температури, яка не перевищує максимальну температуру під час перевезення. Відносна кількість видів додаткової небезпеки легкозаймистих вантажів подано на рис.8.

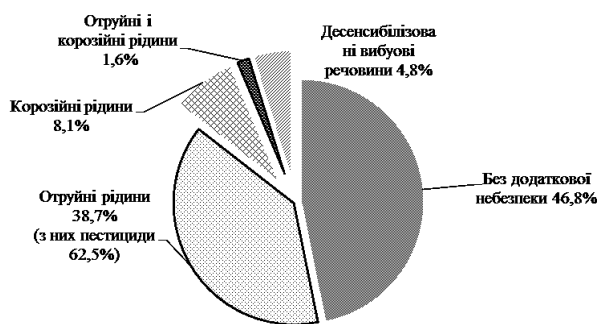


Рис. 8. Відносна кількість видів додаткової небезпеки легкозаймистих вантажів.

До небезпечних вантажів класу 9 належать речовини (включаючи суміші й розчини), матеріали та вироби, які під час транспортування становлять небезпеку, нехарактерну іншим класам. Відносна кількість видів додаткової небезпеки вантажів 9 класу небезпеки надано на рис. 7.

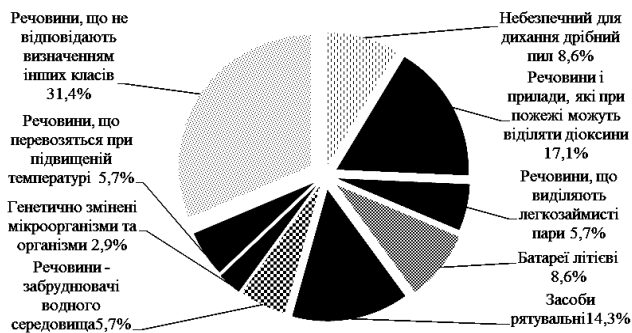


Рис. 9. Відносна кількість видів додаткової небезпеки вантажів класу 9

До небезпечних вантажів класу 2 відносяться гази і вироби, які містять гази. Вантажі цього класу небезпеки поділяються на 3 підкласи: займисті гази, не займисті нетоксичні гази, токсичні гази.

До вантажів цього класу відносяться стиснені (22%) і скраплені гази (43,9%) високого та низького тиску; охолодженні рідкі гази (7,3%); гази, розчиненні під тиском (2,4%), аерозольні упаковки і малі ємкості з газом (4,9%); інші вироби, що містять газ під тиском (12,2%) та зразки газів (7,3%). Дані про відносну кількість вантажів класу 2 за їхніми небезпечними властивостями подані на рис. 10, з даних якого видно, що, наприклад, із стиснених газів найбільшу небезпеку становлять задушливі гази, а із скраплених – задушливі і легкозаймисті гази.

Визначення величин небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій

Досвід ліквідування залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами свідчить про те, що в разі настання аварійної ситуації керівнику оперативного штабу в складних умовах відсутності цілковитої та достатньої інформації про причинно-наслідкові зв'язки між компонентами такої ситуації

необхідно приймати певну кількість індивідуальних, колегіальних, інформаційних, організаційних, оперативних рішень, спрямованих на узгодження, координацію та управління підлеглими пунктами управління та ліквідаційними підрозділами, яка може перевищувати його можливості щодо прийняття таких рішень та/або впливати на їх обґрунтованість.

Прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо ліквідування наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами повинно здійснюватися за допомогою системи підтримки прийняття рішень (СППР), для створення яких слід використовувати математичні моделі прогнозування розвитку аварійних ситуацій та алгоритми дій керівників оперативного штабу.

Велике значення для організації дій ліквідаційних підрозділів має визначення значень параметрів небезпечних чинників транспортних подій за участю стиснених, зріджених, скраплених, розчинених під тиском газів, пов'язаних з розлиттям небезпечних рідин, а також прогнозування параметрів зони забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів, які є найбільш типовими аварійними ситуаціями.

Для прогнозування розвитку небезпечних чинників аварійних ситуацій при транспортуванні вантажів другого і третього класів безпеки, а також сильнодіючих отруйних речовин, на залізничному транспорті використовуються методичні вказівки щодо визначення зон впливу небезпечних факторів аварій із скрапленими вуглеводневими газами, горючими рідинами та аварійно-небезпечними хімічними речовинами [1]. На базі цих вказівок для СППР керівника ліквідації аварій на залізничному транспорті були розроблені комп'ютерні програми аналізу аварійних ситуацій за участю цих вантажів [2, 3].

Структурно-аналітична модель методу визначення величин небезпечних для довкілля чинників аварійних залізничних ситуацій при транспортуванні легкозаймистих речовин надана на рис. 11.

Структурно-аналітична модель методу визначення величин небезпечних для довкілля чинників залізничних аварійних ситуацій з легкозаймистими речовинами дозволяє визначити розміри вибухонебезпечних зон ($R_{НКМР}(t)$) при розгерметизації цистерни і розливанні речовини, площу розлиття $S_p(t)$, масу розлитої речовини $M_p(t)$, масу речовини, що всмокталася у ґрунт $M_v(t)$, масу речовини на поверхні ґрунта $M_n(t)$ на будь-який момент часу.

За допомогою моделі визначаються радіуси зон надлишкового тиску (R_i) та величини надлишкового тиску (ΔP) при вибуху паливо-повітряної суміші, яка утворюється при випаровуванні рідини, а також імпульс тиску що дає змогу визначити умовні імовірності ураження людини і ступені ураження об'єктів довкілля у межах вибухонебезпечних зон.

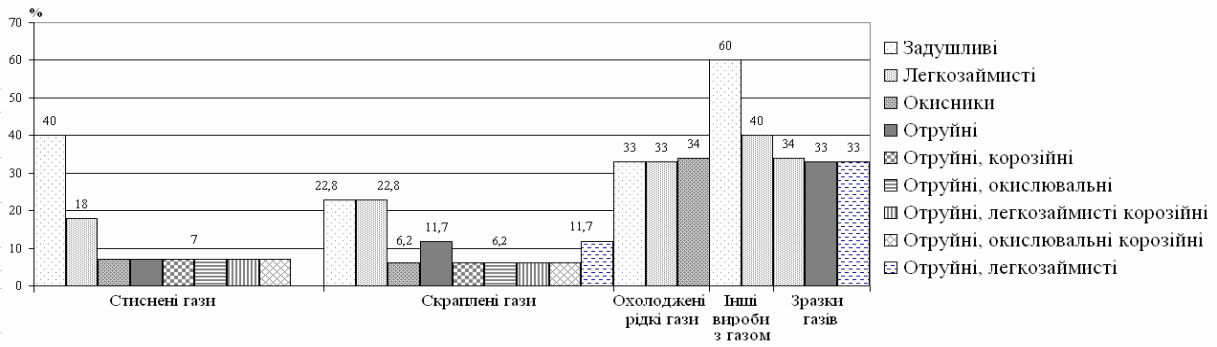


Рис. 10. Відносна кількість вантажів класу 2 за їхніми небезпечними властивостями.

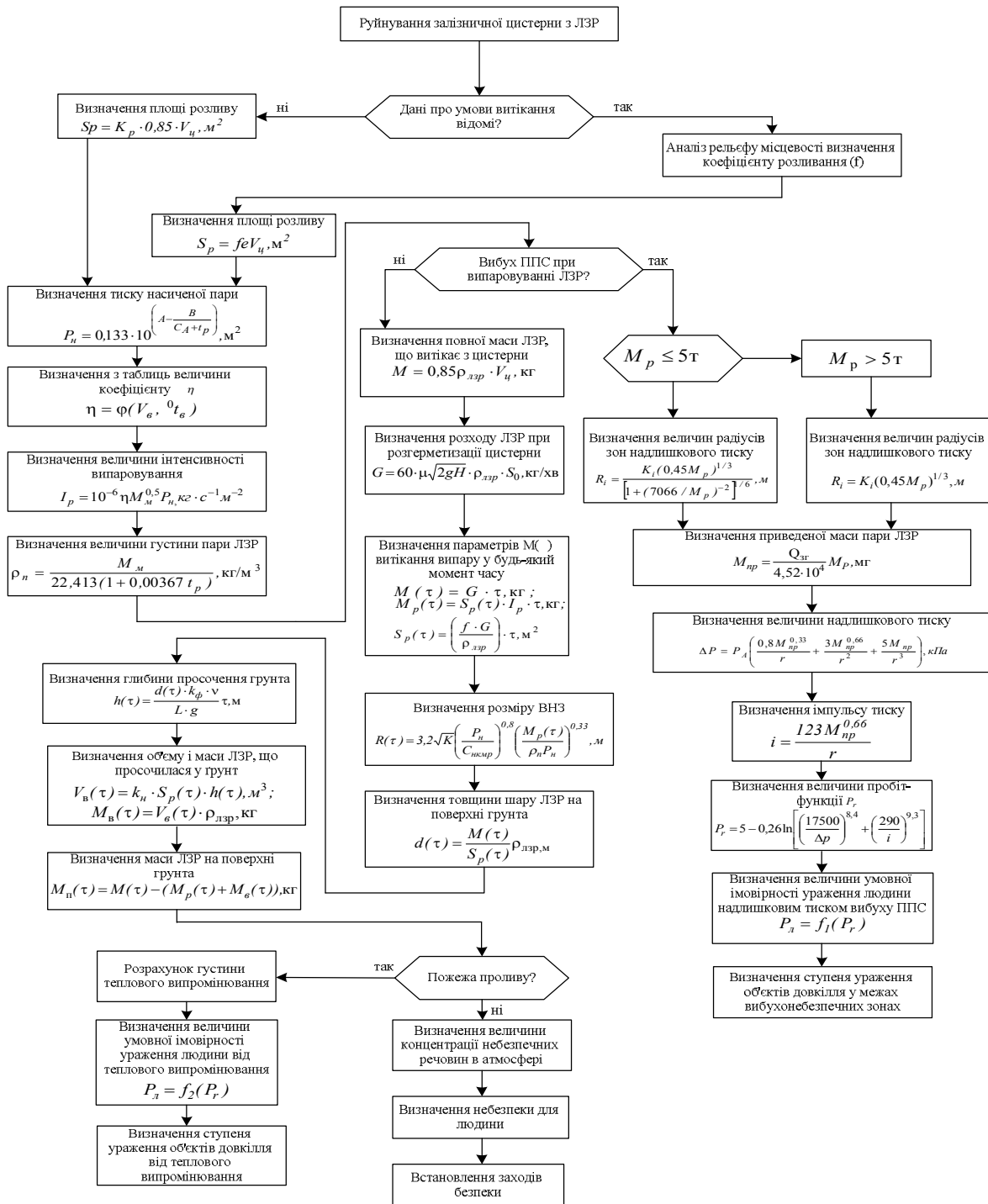


Рис. 11. Структурно-аналітична модель метода визначення величин небезпечних для довілля та життєдіяльності людини чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні легкозаймістих рідин

При розробці структурно-аналітичної моделі були враховані положення методик і рекомендацій [4-9], які не ввійшли у вказівку.

Проведемо, як приклад, розрахунок небезпечних для довкілля чинників аварійної залізничної ситуації пов'язаною з витіканням легкозаймистої речовини (бензину АІ-95) через пошкоджений зливний пристрій ($S_0 = 78,5$ см) стандартної цистерни об'ємом $V_{ц} = 61,2$ м³ на залізничній станції на залізничній станції з нахилом місцевості менше 1% ($f = 5$), темпера-

тура повітря $t_n = 28^{\circ}\text{C}$, швидкість повітряного потоку $V_n = 0$ м/с; площа зливного пристрою $S_0 = 78,5$ см², внутрішній діаметр цистерни $H = 2,8$ м, ступінь заповнення цистерни $\epsilon = 0,85$.

Як це було показано вище, аналогічні ситуації трапляються на залізницях України частіше за інші аварійні ситуації. Характеристики аварійної ситуації при витіканні усієї маси бензину ($M = 42000$ кг) продовж повного часу витікання ($\tau_{пв} = 50$ хв) подані у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики аварійного витікання бензину з цистерни

Час (τ), хв	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Площа розлиття ($S_p(\tau)$), м ²	26,25	52,5	78,75	105	131,25	157,5	183,75	210	236,25	262,5
Маса розлиття ($M(\tau)$), кг	4200	8400	12600	16800	21000	25200	29400	33600	37800	42000
Маса випаровування ($M_p(\tau)$), кг	2,4	9,6	21,6	38,4	60,0	86,5	117,7	153,7	194,6	240,2
Маса всмоктування ($M_b(\tau)$), кг	0,01	0,04	0,09	0,14	0,23	0,33	0,46	0,61	0,77	0,96
Маса на поверхні ґрунту ($M_n(\tau)$), кг	4197,6	8390,4	12578,3	16761,5	20939,8	25113,2	29281,8	33445,7	37604,6	41758,2
Радіус зони загазування ($R(\tau)$), м	12,8	20,2	26,4	31,9	36,9	41,7	46,1	50,4	54,5	58,4

Дані табл. 1 свідчать про те, що найбільш негативний вплив на довкілля за цей період розвитку аварійної ситуації справляють випари легкозаймистої речовини у повітря, накопичення її на поверхні ґрунту із збільшенням площі розливу і радіусу зони загазування. З цієї таблиці видно, що скорочення часу проведення ліквідаційних заходів, наприклад з 35-ї хвилини, тільки на 5 хвилин призведе до зменшення площі розлиття на 26,25 м², маси випаровування бензину у навколишнє середовище на 40,9 кг, маси легкозаймистої рідини на поверхні ґрунту на 415,9 кг та радіусу зони загазування більше ніж на 4 м. Характеристики подальшого розвитку аварійної ситуації після розливу усієї кількості легкозаймистої речовини подані на графіку (рис. 12).

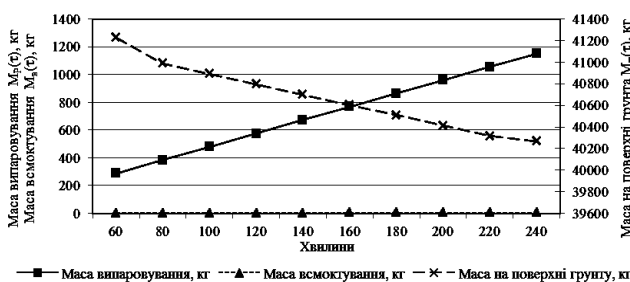


Рис. 12. Залежності маси випаровування $M_p(\tau)$, маси всмоктування $M_b(\tau)$ і маси бензину на поверхні ґрунту $M_n(\tau)$ від часу

Подальший розвиток аварійної ситуації залізничної цистерни з бензином характеризується великою кількістю пари бензину, яка надходить у навколишнє середовище. Маса бензину, що всмоктується у баластну призму залізничного полотна є незначною: на 60-й хв. – 1,2 кг, на 100-й хв. – 1,9 кг, на 140-й хв. – 27 кг; на 240-й хв. – 4,42 кг. Маса легкозаймистої рідини на поверхні ґрунту знижується з

41,2 т на 60-й хв. до 40,3 т на 240-й хв., а радіус зони загазування збільшується відповідно з 62 м до 98 м.

До недоліків структурно-аналітичної моделі, яка використовується для визначення величин небезпечних для довкілля чинників залізничних аварійних ситуацій з отруйними легкозаймистими речовинами є відсутність можливості визначення параметрів забруднення атмосфери в результаті викиду таких речовин, а також обмеження на величину швидкості вітру ($U_b \leq 1$ м/с).

Нині є велика кількість методик і створених на їхніх основах програмних комплексів, які дозволяють моделювати розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері.

Для моделювання розповсюдження пари бензину у безвітряних умовах використовувалася стандартна методика лагранжево-ейлерових моделей атмосферного переміщення небезпечних речовин, які у світовій літературі також називають моделями гаусових «клубів» («puffs»). До моделей такого класу відносяться такі відомі моделі як DIPLOT, RIMPUFF, що є складовими системи Євросоюзу з ядерного аварійного реагування РОДОС, CALPUFF [10-12] та деякі інші. Модель CALPUFF, яка прийнята Агентством з охорони довкілля США, визнана за кращу серед аналогічними моделями для оцінювання переносу забруднювачів та їхнього впливу на довкілля, й є добре верифікованою. У лагранжево-ейлерових моделях розрахунок тривалого викиду здійснюється шляхом розрахунків послідовності миттєвих викидів – так званих лагранжево-ейлерових частинок. Центр мас кожної частинки рухається за полем вітру. Відмінність лагранжево-ейлерових частинок від звичайних лагранжевих частинок нескінченно малого розміру є те, що у даному випадку частинки характеризуються розмірами та розподі-

лом концентрації у частинці. У системі координат, пов'язаній з центром мас, поле концентрації у кожній частинці розподілено у відповідності до поля концентрації внаслідок миттєвого викиду, яке розраховується за гаусовою формулою. Таким чином концентрація C речовини у точці (x,y,z) у момент часу t обчислюється як сума вкладів усіх частинок [12]:

$$C(x,y,z,t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{p=1}^N \frac{q_p \tau \cdot H(t - \tau \cdot p)}{\sigma_{xp} \sigma_{yp} \sigma_{zp}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_p - x}{\sigma_{xp}}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y_p - y}{\sigma_{yp}}\right)^2\right] \times (1) \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_p - z}{\sigma_{zp}}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_p + z}{\sigma_{zp}}\right)^2\right] \right\}.$$

де використана Декартова система координат: вісь z направлена вертикально вгору, рівень $z = 0$ співпадає з рівнем поверхні Землі; τ - тривалість інтервалу часу; $p\tau$ - момент появи p -ї частинки $H(t - p\tau)$ - функція Хевісайда, за рахунок використання якої у розрахунку враховується вплив тільки тих частинок, що встигли з'явитися до моменту часу t ; N - сумарна кількість частинок, що встигла з'явитися до часу t , q_p - середня потужність викиду за час τ , σ_{xp} , σ_{yp} , σ_{zp} - параметри, які характеризують розподіл речовини у частинці по горизонталі та вертикалі. У (1) поверхня Землі вважається площиною і не враховується вплив кінцевої глибини проміжного шару, що припустимо при розрахунку розповсюдження на відстані менші за характерні розміри такої глибини, тобто до 2-х км [12]. Також зроблене стандартне припущення про повне відбиття хмари від поверхні Землі.

Для σ_{xp} , σ_{zp} використовувались співвідношення McElroy & Pooler [13] з моделі CALPUFF, які придатні для використання у тому числі й в умовах міської забудови. Оскільки розрахунки проводились для випадку умов нейтральної стратифікації (категорія стійкості С) наведемо відповідні співвідношення для даної категорії стійкості [12, 15, 16]:

$$\sigma_{xp} = \sigma_{x0} + 0.22l_p(1 + l_p)^{-1/2}; \quad (2)$$

$$\sigma_{zp} = \sigma_{z0} + 0.24l_p,$$

де $l_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}$ - шлях, яка пройшла частинка, а

σ_{x0} , σ_{z0} описують початкову дисперсію хмари, яка щодо горизонтального розміру у розрахунках покладалася рівною характерному середньому розміру розливу ($\sigma_{x0} = 10$ м), а вертикальний початковий розмір покладалася рівним $\sigma_{z0} = 1$ м.

Зрозуміло, що для розрахунку у безвітряних умовах $l_p = 0$, а координати центрів мас частинок не змінюються і співпадають з координатами центра джерела: $x_p = x_s = \text{const}$, і тн. Тоді для врахування того, що навіть у безвітряних умовах хмара підлягає дії турбулентної дифузії (в атмосфері завжди є пориви вітру), формула (2) переводиться у часову за-

лежність шляхом введення характерної швидкості поривів вітру u_0 , яке коливається від 0,5 до 1 м/с при безвітряних умовах [12]. Тоді формули (2) можна переписати у вигляді такої часової залежності:

$$\sigma_{xp} = \sigma_{x0} + 0.22u_0t(1 + u_0t)^{-1/2}; \quad (3)$$

$$\sigma_{zp} = \sigma_{z0} + 0.24u_0t,$$

У розрахунках використовувалось значення $u_0 = 0,5$ м/с.

Описана вище методика моделі CALPUFF широко використовується за кордоном, зокрема на даних натурних вимірювань під час реальних викидів забруднюючих речовин [13-16].

У розрахунках нехтувалося ефектами "важкого газу". Згідно [17] даним ефектом можна нехтувати, якщо значення наступного параметру Π задовольняє умові:

$$\Pi = \frac{1}{u_0} \left(\frac{g}{D_0} \left(\frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_a} \right) \left(\frac{Q}{\rho_g} \right) \right)^{1/3} \leq 0.15.$$

Для обраних параметрів ($u_0 = 0,5$ м/с, інтенсивність викиду $Q = 0,08$ кг/с, діаметр розливу $D=10$ м, початкова густина газу $\rho_{g0} = 1,2\rho_a$, густина атмосферного повітря $\rho_a = 1,2$ кг/м³) отримаємо значення $\Pi_0 \approx 0,4$. Отже, на початковій стадії (близько до джерела), ефекти важкого газу за даним сценарієм важливі. Але при розповсюдженні газ розбавляється з оточуючим повітрям, і можна оцінити, на якій відстані ці ефекти перестають впливати. У [18] підтверджена безрозмірна залежність ступеню розбавлення важкого газу від відстані поширення (рис. 4 з цитованої роботи), з якої для даного випадку можна отримати, що вже на відстані $r_1 = 10$ м від джерела розливу початкова концентрація речовини розбавляється повітрям зменшуючись у 10 разів. Це відбувається за рахунок гравітаційного руху важкого газу, який генерує інтенсивне початкове перемішування. Тоді густина газової суміші буде значно меншою:

$$\rho_g = 0.9\rho_a + 0.1\rho_{g0} = 0.9\rho_a + 0.1 \cdot 1.2\rho_a = 0.02\rho_a$$

Відповідне значення параметру Π стає:

$$\Pi = \frac{1}{u_0} \left(\frac{0.02g}{D_0 + 2r_1} \left(\frac{Q}{\rho_{g0}} \right) \right)^{1/3} \approx 0.14,$$

що дозволяє для даного сценарію нехтувати ефектами важкого газу на відстанях понад 10 м від джерела газу.

У результаті проведених розрахунків отримані залежності величини концентрації пари бензину (C , кг/м³) на різних відстанях ($10\text{м} < r < 1000\text{м}$) через кожні 10 м від аварійного отвору при певних значеннях часу (t) від початку витоку кожні 10 хв. до 24 год. Це дасть змогу встановити рівень небезпеки для працівників залізниці у парку станції з аварійною цистерною і пасажирів на перонах вокзального комплексу. Отримані дані дозволять керівнику ліквідації аварії визна-

чити засоби індивідуального захисту для працівників залізниці і аварійних підрозділів Державної служби з надзвичайних ситуацій, які беруть участь у ліквідуванні наслідків аварійної ситуації, час початку і тривалість аварійно-відновних робіт щодо евакуації персоналу і пасажирів, надання їм, при необхідності, першої долікарської та медичної допомоги.

Розглянемо залежність концентрації (C , $\text{мг}/\text{м}^3$) пари бензину у довірлі від часу t на відстанях $R_1=10\text{м}$ (радіус розлиття речовини) і $R_2=100\text{м}$ (межа вибухонебезпечної зони). Дані щодо значень концентрацій на вказаних відстанях при різних значеннях часу надані у табл. 2.

Таблиця 2

Значення концентрацій пари бензину у довірлі на відстанях $R_1=10\text{м}$, $R_2=100\text{м}$

$R, \text{м}$ \ t	10 хв..	20 хв..	30 хв..	40 хв..	50 хв..	70 хв..	240 хв..	250 хв..	260 хв..	280 хв..
10	333	785	1240	1690	2260	1140	1130	6,29	2,7	0,982
100	0,51	2,93	6,24	9,88	14,7	11,1	10,2	6,29	2,7	0,982

Графіки залежності величини концентрації пари бензину у довірлі на відстанях $R_1=10\text{м}$, $R_2=100\text{м}$ від часу у логарифмічному масштабі представлені на рис. 13. Графіки (рис. 13) свідчать про те, що за період з 10-ої та 50-ту хвилину значення концентрації збільшуються з $333\text{мг}/\text{м}^3$ до $2260\text{мг}/\text{м}^3$ для відстані $R_1=10\text{м}$, й від $0,51\text{мг}/\text{м}^3$ до $14,7\text{мг}/\text{м}^3$ для відстані $R_2=100\text{м}$. За період з 50-ої хвилини, на якій здійснилося повне витікання речовини з цистерни, й до 70-ї хвилини значення концентрації знизилася від $2260\text{мг}/\text{м}^3$ до $1140\text{мг}/\text{м}^3$ (відстань $R_1=10\text{м}$), за цей же період часу концентрація пари на відстані $R_2=100\text{м}$ знизилася від $14,7\text{мг}/\text{м}^3$ до $11,2\text{мг}/\text{м}^3$. Більш стрімке падіння концентрації відстані $R_1=10\text{м}$ у порівнянні із зниженням концентрації на відстані $R_2=100\text{м}$ можна пояснити тим, що швидкість падіння концентрації тим більша, чим менша відстань до джерела викиду. На значних відстанях від джерела,

деякий час після припинення його дії, падіння концентрації у повітрі сповільнюється впливом хмари, яка встигла утворитися до припинення дії джерела. При цьому розмір хмари, яка впливає на концентрацію у даній точці після припинення дії джерела, визначається відстанню від даної точки до джерела. Тому для точок, що знаходяться поблизу джерела, лише незначна частина хмари впливає на величини концентрації, що призводить до надзвичайно швидкого падіння рівня забруднення. У точках, які знаходяться на відстані, швидкість падіння забруднення сповільнюється, і може навіть зростати деякий час після припинення дії джерела.

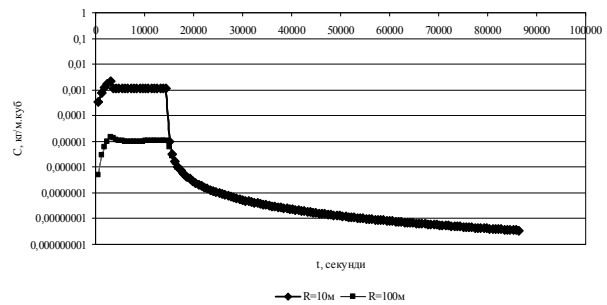


Рис. 13. Графіки залежності величини пари бензину на відстанях $R_1=10\text{м}$, $R_2=100\text{м}$ від часу

з 70-ої хвилини і до повного випаровування рідини з проливу концентрація пари змінюється з $1140\text{мг}/\text{м}^3$ до $1130\text{мг}/\text{м}^3$ й від $11,1\text{мг}/\text{м}^3$ до $10,2\text{мг}/\text{м}^3$ на відстанях $R_1=10\text{м}$, $R_2=100\text{м}$ відповідно. Починаючи з 250-ї хвилини середнє значення пари в атмосфері швидко вирівнюється і стає однаковою на усіх відстанях, що розглядаються.

Розглянемо залежність концентрації пари бензину у довірлі на різних відстанях від джерела викиду при певних значеннях часу. Дані щодо залежності концентрації пари бензину у довірлі від джерела викину при різних значеннях часу подані у табл. 3.

Таблиця 3

Дані щодо залежності концентрації пари бензину у довірлі на різних відстанях від джерела викину при певних значеннях часу (в %)

$R, \text{м}$ \ t	10 хв.	50 хв.	60 хв.	240 хв.
0	0,0466780529	0,3150208387	0,1585422472	0,1578912154
10	0,0333658701	0,2262158959	0,1141345457	0,1134878023
20	0,0136808623	0,0948176872	0,0484198992	0,0477858485
30	0,0046256980	0,0341950863	0,0180831925	0,0174697348
40	0,0017829665	0,0149243363	0,0084133004	0,0078275352
50	0,0008692812	0,0084783761	0,0051477441	0,0045957293
60	0,0004618526	0,0053993564	0,0035589182	0,0030454988
70	0,0002569391	0,0036847873	0,0026471010	0,0021758143
80	0,0001470896	0,0026339730	0,0020635817	0,0016366396
90	0,0000858340	0,0019457544	0,0016594270	0,0012777689
100	0,0000510490	0,0014753325	0,0013637910	0,0010271963
110	0,0000307183	0,0011410006	0,0011371986	0,0008444430
120	0,0000186485	0,0008973342	0,0009580834	0,0007071237

Графіки залежності концентрації пари бензину у довкіллі на різних відстанях від джерела викиду при різних значеннях часу наведені на рис. 14.

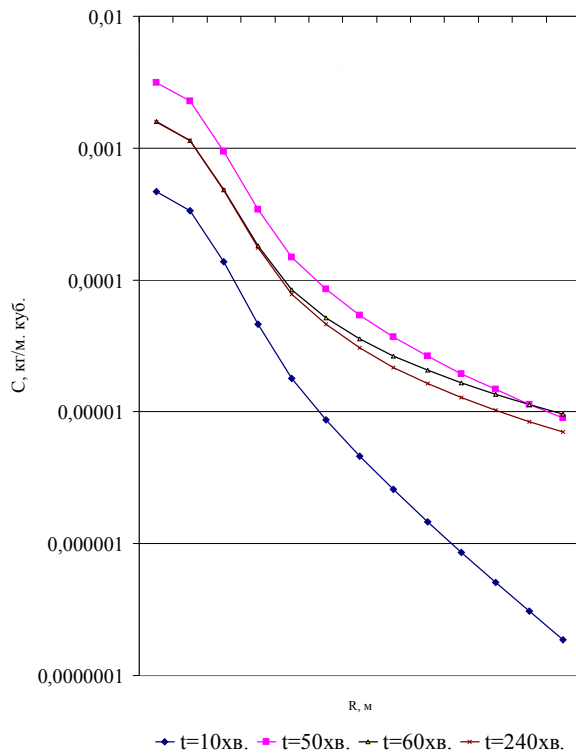


Рис. 14. Графіки залежності концентрації пари бензину на різних відстанях у визначені моменти часу

З рис. 14 можна зробити висновки про те, що на 10-ту хвилину концентрація пари зменшується від 467 мг/м^3 до 137 мг/м^3 на відстані до 20м. У цей період перевищення концентрації у порівнянні з ГДК= 100 мг/м^3 дорівнює від 4,67 разів до 1,37 разів.

На 50-ій хвилині рівень концентрації перевищує ГДУ у 31,5 рази на місці викиду і 1,49 рази на відстані 40м. Концентрація стає нижчою за ГДК на відстані 50м.

На 60-ій хвилині рівень концентрації пари з проливу рідини перевищує ГДК від 15,87 разів до 1,81 рази (30м). На відстані 40м концентрація стає меншою за ГДК ($C=84,1 \text{ мг/м}^3$).

На 240 хвилині значення концентрацій на відстані до 40м практично співпадає із значенням концентрації для 60-ї хвилини, після чого здійснюється її різке падіння.

При значеннях концентрацій пари більших за ГДК, ліквідування наслідків аварійних ситуацій повинно здійснюватися лише у засобах індивідуального захисту, визначених відповідною аварійною картою.

Висновки

Багаторічне використання розглянутої вище структурно-аналітичної моделі дозволяє відзначити, що за її допомогою можливо визначати основні па-

раметри залізничних аварійних ситуацій з легкозаймистими вантажами, що не є отруйними.

У даній роботі вперше проведено розрахунок забруднення зон уражень внаслідок аварійного викиду легкозаймистої речовини (бензину АІ-95) на основі оцінювання джерела викиду згідно запропонованої методики оцінювання часової залежності інтенсивності викиду, яка була інтегрована у сучасну модель атмосферного перенесення небезпечних речовин. Це дозволило врахувати часову мінливість джерела викиду та розрахувати нестационарні часові залежності концентрацій отруйної хімічної речовини в атмосфері на різних відстанях від джерела викиду.

Для оцінювання небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій другого і третього класів небезпеки необхідно створити в Україні методику, яка б дозволяла:

враховувати: особливості залізничного транспорту (одночасно наявність у парках станції великої кількості рухомого складу з небезпечними вантажами, які мають різноманітні фізико-хімічні, пожежовибухові та аварійно хімічно небезпечні властивості); стан стійкості атмосфери, температури повітря і ґрунту, рельєф місцевості та його забудову, наявність і розміри водойм і селітебної зони;

визначати: кількість газу і пари легкозаймистих речовин у довкіллі; просторово-часове поле концентрації отруйних речовин в атмосфері; розміри зон хімічного забруднення; розміри зон дрейфу пожежовухопонебезпечних хмар, в межах яких зберігається здатність до займання, розміри зон розповсюдження пожежі (пожежі – спалаху) або детонації, появи горілих продуктів, а також часу підходу зон до визначених об'єктів; кількість отруйних речовин у хмарах, обмежених концентраційними межами запалення; значення виражальних чинників вибуху; наслідків впливу ударно-хвильових навантажень на людей і об'єкти залізничної інфраструктури.

Створені на базі такої методики програмні комплекси для реалізації відповідних математичних моделей повинні мати зручний інтерфейс для роботи користувачів середньої кваліфікації у стресових умовах аварійних ситуацій.

Список літератури

1. *Руководство по определению зон воздействия опасных факторов аварий с сжиженными газами, горючими жидкостями и аварийно химически опасными веществами на объектах железнодорожного транспорта.* – М.: ГИПРОТРАНСТЭИ, 1997. – 124с.
2. *Комп'ютерна програма аналізу надзвичайної ситуації, яка супроводжується пожежею, що виникла внаслідок аварії цистерни зі скрапленими вуглеводневими газами / Юхимчук С.В., Потетюєв Ю.Ф., Великодний В.В., Кацман М.Д., Поремський Ю.В., Захарченко Л.М. . Свідчення Державного департаменту інтелектуальної влас-*

ності Міністерства освіти і науки України про реєстрацію авторського права на твір № 16304 (дата реєстрації 13.04.2006 р.)

3. Комп'ютерна програма аналізу надзвичайної ситуації, яка супроводжується пожежею, що виникла внаслідок аварії цистерни з легкозаймистою речовиною / Юхимчук С.В., Потетюєв Ю.Ф., Великодний В.В., Кацман М.Д., Поремський Ю.В., Захарченко Л.М. . Свідчення Державного департаменту інтелектуальної власності Міністерства освіти і науки України про реєстрацію авторського права на твір № 16305 (дата реєстрації 13.04.2006 р.)

4. НАПБ Б.03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежею небезпечкою. Наказ МНС України від 03.12.2007 №833. Електронне джерело: www.dnaor.com/get/32350

5. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. РД 03-409-01. – М.: Гостехнадзор РФ, 2001. – 16с.

6. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. – М.: Минтопэнерго РФ, 1995. - 122с.

7. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически-опасных объектах и транспорте. РД 52.02.253-90. – СПб, 2000. – 16с.

8. Кацман М. Д. Ліквідація пожеж на залізничному транспорті : Посіб. / М. Д. Кацман, Г. Б. Кононов, І. В. Діденко, Н. В. Огороднічук; Держ. територ.-галуз. об-ня "Півд.-Зах. з-ця". Служба відом. воєніз. охорони. Центр підготов. ряд. складу відомчої воєніз. охорони. - К. : Основа, 2006. - 210 с.

9. Мироненко В. К. Моделювання впливу часу локалізації та ліквідації аварійного розливу нафтопродукту на характеристики зони забруднення верхньої будови залізничної колії / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, О. А. Горещкий // Стратегія якості в промисловості та образванні: XI міжнародна конференція, 5–12 жовтня 2015 з. тези доп. – Варна, 2015. – С. 113–117.

10. Andronopoulos S. RODOS DIPLOT model description and evaluation [Електронний ресурс] / S. Andronopoulos, E. Davakis, J.G. Bartzis // RODOS report RODOS(RA)-TN(09)-01. – Greece, Athens: National Center for Scientific

Research, 2009. – 27 p. – Режим доступу: <https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/>

11. RIMPUFF [Електронний ресурс] / S. Thykier Nielsen, S. Deme, T. Mikkelsen // Report RODOS WG2_TN98_02. – Denmark, Roskilde: RISO National Laboratory, 1998. – 48 p. – Режим доступу: <https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/>

12. Scire J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J., 2000. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5). USA, Concord: Earth Tech, Inc., 2000.

13. Akula Venkatram, An examination of the urban dispersion curves derived from the St. Louis dispersion study, In Atmospheric Environment, Volume 39, Issue 21, 2005, Pages 3813-3822

14. Ковалец І.В., Мадерич В.С., Железняк М.І., 2009. Моделирование атмосферного переноса продуктов горения желтого фосфора в результате железнодорожной аварии 16 июля 2007 г. возле с. Ожидов Львовской области // 36. доп. V-ї дист. наук.-практ. конф. з міжнар. участю "Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. СІПР'2009", (Київ, 8 червня 2009). – К.: НАН України, Ін-т проблем математичних машин і систем, 2009. – С. 133–137

15. Халченков А.В., Ковалец І.В., 2012. Реализация и тестирование модуля атмосферного переноса в программе Ecolego // 36. наук. пр. Инстит. проблем моделирования в энергетике ім. Г.Є. Пухова. – 2012. – №.65 – С.3-10

16. Kovalets I.V., Asker C., Khalchenkov A.V., Persson C., Lavrova T.V. (2017) Atmospheric dispersion of radon around uranium mill tailings of the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine // J. of Environmental Radioactivity, V.172, 173-190, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.025>

17. Britter R. E.: 1989, Atmospheric dispersion of dense gases, Ann. Rev. Fluid Mech., 21, 317-344.

18. Kovalets I.V., Maderich V.S., 2006. Numerical simulation of the interaction of the heavy gas cloud with the atmospheric surface layer. Environmental Fluid Mechanics, 6(4), 313-340.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ОПАСНЫМИ ГРУЗАМИ

А.И. Запорожец, И.В. Ковалец, М.Д. Кацман

В работе рассматривается состояние перевозки опасных грузов железнодорожным транспортом Украины, динамика транспортных происшествий при перевозке опасных грузов. Предложена методика оценки временной зависимости интенсивности выброса легко воспламеняющегося вещества, которая была интегрирована в современную модель атмосферного переноса опасных веществ. Проведен расчет зон поражений вследствие аварийного выброса бензина АИ-95, что позволило учесть временную изменчивость источника выброса и рассчитать временные зависимости концентрации бензина в атмосфере на разных расстояниях от аварийной железнодорожной цистерны.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, опасный груз, транспортное происшествие, аварийная ситуация, концентрация опасного вещества, математическая модель.

ASSESSMENT OF THE CONSEQUENCES OF RAILWAY EMERGENCIES WITH DANGEROUS GOODS

O.I. Zaporozhets, I.V. Kovalets, M.D. Katsman

The article considers the state of transportation and the dynamics of transport events with the dangerous goods during the transportation by the railway transport of Ukraine. The method of estimating the time dependence of the emission intensity of a flammable substance, which was integrated into the modern model of atmospheric transport of hazardous substances, was proposed. The calculation of damage zones due to the accidental release of gasoline AI-95 has been made, which made it possible to take into account the temporal variability of the source of emissions and to calculate the time dependences of the concentration of gasoline in the atmosphere at different distances from the emergency railway tank.

Keywords: railway transport, dangerous goods, transport event, emergency situation, hazardous substance concentration, mathematical model.

УДК 621.318

В.М. Триснюк¹, А.А.Нікітін², В.О. Шумейко¹¹ Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України, Київ,² Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ

АЛГОРИТМ ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО РАДІОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ МІСЦЕВОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ДЗЗ ТА ГІС

Стаття присвячена розробленню алгоритму оброблення інформації про радіоактивне забруднення місцевості з використанням даних ДЗЗ та ГІС. Радіоактивне забруднення місцевості є потужним фактором впливу на життєдіяльність населення, роботу адміністративних структур і органів державного управління в цілому. Виявлення радіоактивного забруднення місцевості являється першочерговою задачею ліквідації наслідків радіоактивного забруднення.

Ключові слова: радіаційної обстановки, математична модель, ядерна енергетика, радіаційна розвідка.

Вступ

Питання постійного контролю радіаційної обстановки (РО) і своєчасного виявлення радіоактивного забруднення місцевості (РЗМ) продовжують залишатися актуальними і в наш час. Це обумовлено трьома факторами: збільшенням кількості об'єктів ядерної енергетики, старінням існуючих атомних реакторів, активізацією сил міжнародного екстремізму, які сприяють активізації терористичних актів по всьому Світу. У випадку загострення міжнародної обстановки неможливо виключити можливість атаки терористів на об'єкти атомної енергетики, підприємства атомної енергетики, а також могильники радіоактивних відходів. Таким чином, можливе виникнення ситуації, коли значні території будуть радіоактивно забруднені від декількох джерел.

Виклад основного матеріалу

Джерелами радіоактивного забруднення в мирний час можуть бути:

- аварії атомних енергетичних установок з викиданням продуктів реакції;
- руйнування сховищ (контейнерів) з радіоактивними речовинами;
- руйнування активної зони чи системи теплоносія атомних енергетичних установок в результаті терористичних актів;
- руйнування могильників радіоактивних відходів.

На сьогоднішній день виявлення РЗМ може здійснюватися за допомогою прогнозу і на основі фактичних даних радіаційної розвідки і спостереження [1].

При прогнозуванні використовуються відомості про джерела радіоактивного забруднення (рис. 1) і метеорологічна інформація (рис. 2).

Виявлення і оцінка радіаційної обстановки здійснюється, як правило, в два етапи. На першому

– на основі даних про джерела радіоактивного забруднення і метеорологічної обстановки проводиться прогноз РЗМ. На другому – виявляється фактична радіаційна обстановка по даним розвідки (контролю). Прогноз РМЗ здійснюється шляхом вирішення інформаційно-розрахункової задачі (рис. 3).

Вихідною інформацією для інформаційно-розрахункової задачі є (табл. 1):

1) Інформація про АЕС:

- тип ядерного енергетичного реактору (ЯЕР) (РВБК або ВВЕР);
- електрична потужність ЯЕР (МВт);
- кількість аварійних ЯЕР – n;
- координати ЯЕР (АЕС);
- астрономічний час аварії ($T_{ав}$, доба, год.);
- доля викинутих із ЯЕР радіоактивних речовин (h, %).

2) Метеорологічні характеристики:

- швидкість вітру на висоті 10 м (V_{10} , м/сек);
- напрямок вітру на висоті 10 м (L_{10} , град);
- стан хмарності (відсутній, середній або суцільний);
- температура повітря ($T_{пов}$);
- вид місцевості (лісиста, лісисто-болотиста, степова, лісостепова);
- тип рослинності (хвойна, змішана, листяна);
- вид рельєфу: рівнинний, рівнинно-хвилястий, рівнинно-горбистий, горбисто-балочний, горбистий, передгір'я);
- пора року (літо, зима).

При врахуванні в розрахунках пори року літо приймається з 15 травня до 30 жовтня, зима – з 30 жовтня по 15 травня. Вказані періоди обумовлюються наявністю листя на деревах, яке впливає на швидкість та дальність розповсюдження радіоактивних речовин.

Достовірність прогнозу буде залежати від відповідності математичної моделі, яка застосовується для конкретної аварії і від точності вхідних даних.

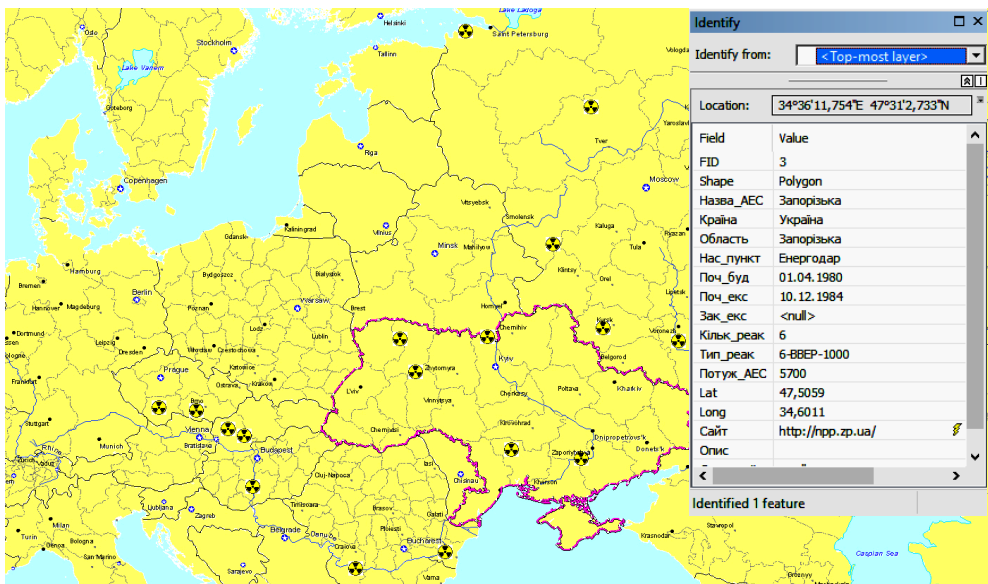


Рис. 1. База геоданих атомних електростанцій (АЕС)

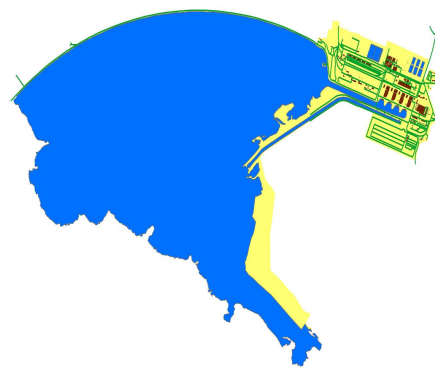


Рис. 2. Метеорологічна інформація

Таблиця 1

Характеристика змінної інформації

Параметр	Найменування параметру	Розмірність	Межі зміни
n	Кількість аварійних ЯЕР	од.	1→4
T _{AB}	Астрономічний час аварії	год., доба	1→356
h	Доля викинутих із ЯЕР радіоактивних речовин	%	3→50
V ₁₀	Швидкість вітру	од.	< 2→ < 6
L ₁₀	Напрямок вітру	град.	0→360
T _{пов}	Температура повітря	град.С	- 40 до + 40

Результати прогнозу можуть бути використані тільки для приблизної оцінки радіаційної обстановки [2]. З часом актуальність прогнозу втрачається, чим більше часу пройшло з моменту аварії, тим нижче достовірність моделі, а також, при певних умовах, модель може некоректно описувати РЗМ.

Для отримання уточненої карти РЗМ необхідно проводити радіаційну розвідку місцевості.

Радіаційна розвідка проводиться підрозділами РХБ розвідки в районах визначених для розвідки, як правило після проведення прогнозування за фактом аварії (руйнуванні) на ПНО. Основним способом ведення радіаційної розвідки районів є спосіб опорних точок, якій передбачає завчасний вихід до спланованих районів підрозділів РХБ розвідки і ведення

радіаційного спостереження або розвідки в визначених пунктах і періодичний об'їзд районів по намічених маршрутах. Вся інформація про потужності доз опромінення та метеобстановку, передається по каналам зв'язку в розрахунково-аналітичні станції (групи) для аналізу для створення реальної картини про фактичну радіаційну обстановку.

Дані радіаційної розвідки:

- значення вимірювання потужності дози опромінювання (D_{вим}, рад/год);
- час виміру потужності дози опромінювання (T_{вим}, доба, год.).

Найбільш перспективним є розробка методики послідовної параметричної адаптації моделі РЗМ даними радіаційної розвідки.

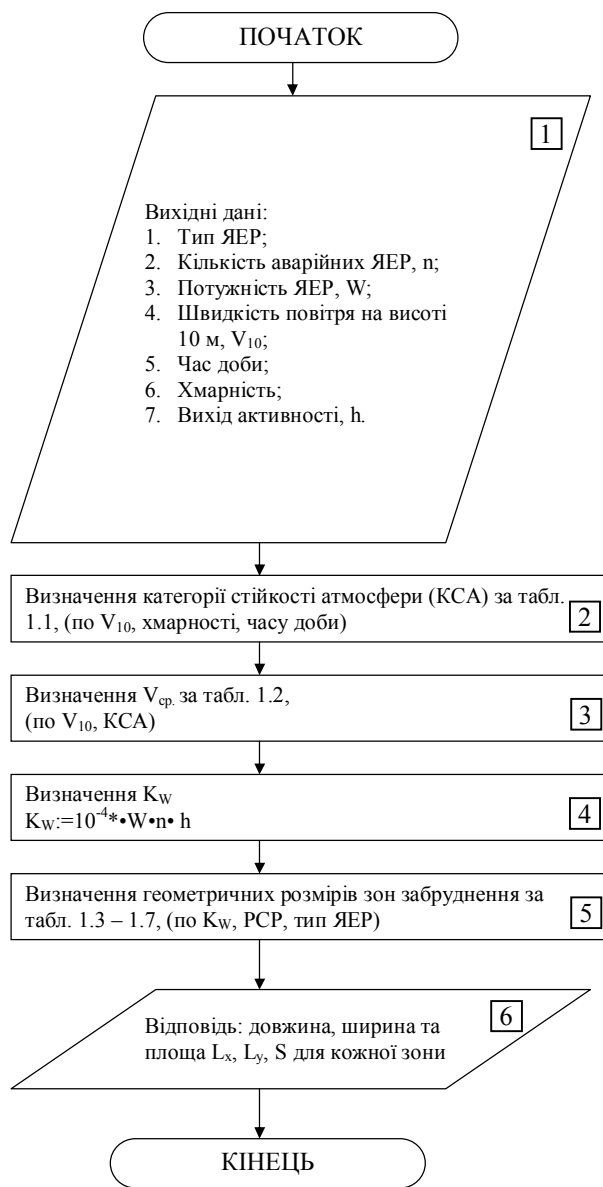


Рис. 3. Алгоритм визначення геометричних розмірів зон забруднення

Під час аварії ядерної енергетичної установки може бути використана така модель [2]:

$$D_x = K_w \cdot \left(10^\alpha / (u_p^\beta \cdot x^\gamma) \right) \cdot \mathfrak{Z}; \quad (1)$$

$$D_{xy} = D_x \exp\left(-y^2 / (2\sigma_y^2)\right); \quad (2)$$

$$D_t = D_0 \cdot 0.5 \left[1 - \operatorname{erf}\left(\sqrt{k} \cdot \ln(t/t_{50})\right) \right], \quad (3)$$

де D_x – потужність дози випромінювання на осі сліду через 1 годину, рад/г; u_p – середня швидкість вітру в шарі 0-200 м, м/с; α, β – коефіцієнти, що залежать від категорії стійкості атмосфери і типу ядерного реактора; $\gamma = a - b \cdot \lg u_p$; a, b – регресивні коефіцієнти, що залежать від категорії стійкості атмосфери і типу ядерного реактора; x – відстань від АЕС по осі сліду, км; \mathfrak{Z} – поправочний коефіцієнт, що враховує збільшення потужності дози на початковій ділянці сліду; $K_w = 10^{-4} \cdot \eta_p \cdot W$; n – кількість

ядерних енергетичних реакторів (ЯЕР); η_p – частка радіоактивних речовин, викинутих з ЯЕР, %; W – електрична потужність ЯЕР, МВт; D_{xy} – потужність дози випромінювання в перпендикулярному напрямку від осі сліду на відстані y км, рад/год.; C_3 – коефіцієнт, що залежить від категорії стійкості атмосфери; D_t – потужність дози випромінювання на момент часу t після аварії, рад/год; D_0 – потужність дози випромінювання на момент часу 0 після аварії, рад/год; \sqrt{k} – параметр закону, що залежить від типу ЯЕР і тривалості кампанії; t – заданий час після аварії ЯЕР, год.; t_{50} – параметр закону (час, за який потужність дози D_0 зменшується вдвічі), год; інтеграл помилок – $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz$; $\sigma_H = \frac{C_3 x}{\sqrt{1 + 0.1x}}$.

Ця модель вимагає наявності векторів параметрів об'єкта аварії V і метеоумов U .

Достовірність прогнозу залежить від достовірності джерел інформації, тобто чим точніше дані про джерела радіоактивного забруднення і інформація про погоду, тим надійніше прогноз. Звичайно те, що на якості прогнозу позначаються не тільки помилки визначення параметрів джерел радіоактивного забруднення (координати джерела, потужність викиду, час), але й наявність незареєстрованих або помилкових (що не мали місця в дійсності) джерел. Слід зауважити, що при пульсуючому характері викидів радіоактивних речовин з аварійного реактора, кожен такий викид може розглядатися як самостійне джерело радіоактивного забруднення.

Достовірність прогнозу, з точки зору надійності прийнятих рішень, вкрай низька через неповноту інформації про джерела радіоактивного забруднення або великих похибок визначення їх параметрів [2, 3]. Виходячи з цього, як вже було зазначено вище, результати прогнозування повинні бути обов'язково уточнені даними розвідки.

Рішення такого завдання можливе шляхом виявлення фактичного РЗМ за даними радіаційної розвідки. Однак, з одного боку, це вимагає досить великих витрат часу на збір даних радіаційної розвідки (з щільністю достатньою для виявлення фактичного РЗМ), а з іншого – після виявлення фактичної радіаційної обстановки відпадає необхідність у використанні прогнозу. Було б логічно спробувати підвищити достовірність прогнозу не після повного виявлення РЗМ, а в той час, коли дані розвідки ще не повністю зібрані, та тільки частково надійшли на пункт управління. При цьому, в разі необхідності, потрібно уточнити, скоригувати прогноз.

Таким чином, ми стикаємося з окремим випадком завдання розпізнавання образів. Перші спроби вивчення можливостей автоматизації таких процесів відносяться до 50-х років. В даний час вже склалися основні концепції теорії розпізнавання. Так, в роботі [4] сформульовані основні завдання, що виникають при розробці систем розпізнавання образів:

надання вихідних даних;

виділення характерних ознак з отриманих вихідних даних і зниження розмірності векторів образів (попередня обробка та вибір ознак);

побудова систем розпізнавання образів, визначення оптимальних вирішальних процедур, необхідних при ідентифікації та класифікації.

Отже, для підвищення достовірності прогнозу РЗМ необхідно побудувати розпізнавальну систему,

яка є стійкою до перешкод, здатна впоратися з істотними відхиленнями розпізнаваних об'єктів і володіє здатністю до самонастроювання, тобто вирішити задачу адаптації. Функціональна блок-схема такої системи зображена на рис. 4. Ідея рішення задачі адаптації моделі РЗМ даними радіаційної розвідки, з використанням теорії розпізнавання образів представлена на рис. 5.

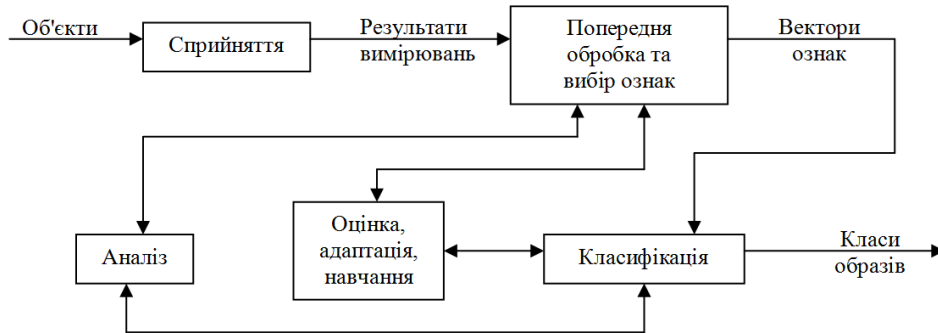


Рис. 4. Функціональна блок-схема адаптивної системи розпізнавання образів

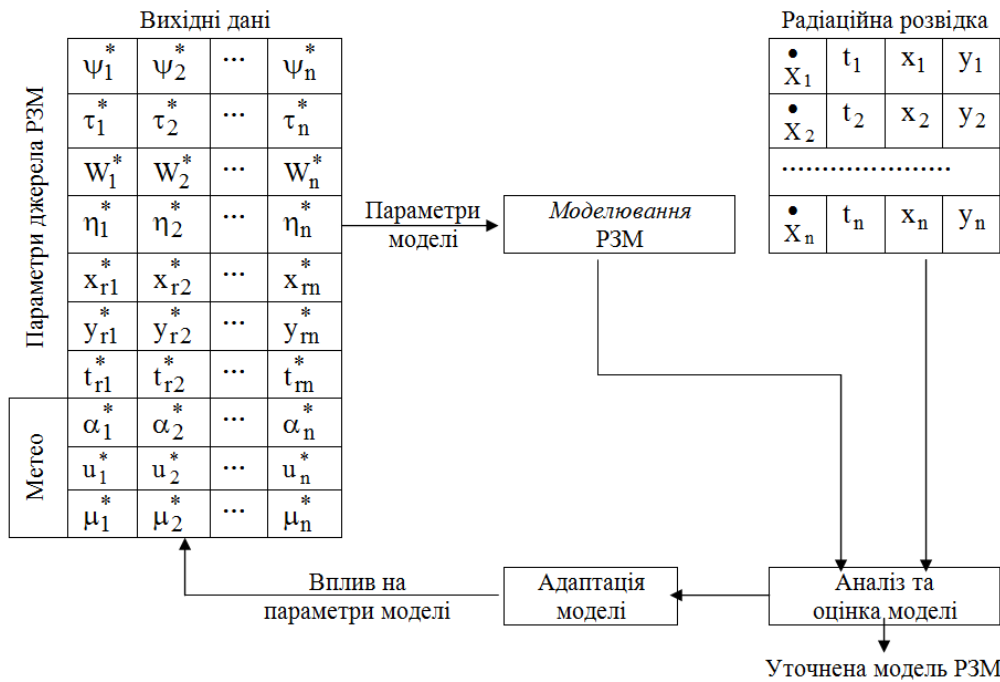


Рис. 5. Функціональна блок-схема послідовної параметричної адаптації моделі РЗМ даними радіаційної розвідки місцевості

Вихідні дані, представлені на схемі, позначені зірочкою. Це вказує на те, що величини, які розглядаються в даному випадку, інтерпретуються тільки як параметри моделі РЗМ, що дозволяє на етапі адаптації змінювати значення параметрів з метою максимально узгодити модель з даними радіаційної розвідки. При цьому знову отримані величини, можуть відрізнятися від фактичних значень, тому що одне й теж поле РЗМ може бути описано за допомогою різних комбінацій значень параметрів. Надалі таке уявлення моделі будемо називати параметричною моделлю.

Таким чином, вихідні дані можна записати у вигляді матриці

$$\begin{pmatrix} V_1^*, U_1^* \\ V_2^*, U_2^* \\ \dots \\ V_n^*, U_n^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{r1}^*, y_{r1}^*, t_{r1}^*, \psi_1^*, \tau_1^*, w_1^*, \eta_{p1}^*, \alpha_1^*, u_1^*, \mu_1^* \\ x_{r2}^*, y_{r2}^*, t_{r2}^*, \psi_2^*, \tau_2^*, w_2^*, \eta_{p2}^*, \alpha_2^*, u_2^*, \mu_2^* \\ \dots \\ x_{rn}^*, y_{rn}^*, t_{rn}^*, \psi_n^*, \tau_n^*, w_n^*, \eta_{pn}^*, \alpha_n^*, u_n^*, \mu_n^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

де V^*, U^* – множини векторів параметрів моделі РЗМ при аварії ЯЕР; x_{ri}^* – параметр, що описує координату x i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості; y_{ri}^* – параметр, що описує координату y i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості; t_{ri}^* – параметр, що описує час аварії i -го джерела радіоактивного

забруднення місцевості, год.; ψ_i^* – параметр, що описує тип ЯЕР i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості; τ_i^* – параметр, що описує тривалість кампанії i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості, доб.; w_i^* – параметр, що описує електричну потужність i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості, МВт; η_{pi}^* – параметр, що описує частку викиду радіонуклідів i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості, %; α_i^* – параметр, що описує напрямок середнього вітру в шарі 0-200 м для i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості, град.; u_i^* – параметр, що описує швидкість середнього вітру в шарі 0-200 м для i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості, м/с; μ_i^* – параметр, що описує категорію стійкості атмосфери для i -го джерела радіоактивного забруднення місцевості.

Основна відмінність такої параметричної моделі від раніше розглянутих полягає в тому, що кожен рядок матриць розглядається не як характеристика джерела радіоактивного забруднення, а як вектори $V_i^*, U_i^* (V_{si}^*, U_{si}^*)$ параметрів моделі.

Таке уявлення вихідних даних дозволяє коригувати окремі параметри моделі з метою максимально наблизити її до фактичної радіаційної обстановки. Крім того, допускається введення в матрицю додаткових рядків (або видалення наявних) для підвищення достовірності моделі.

Слід особливо підкреслити, що параметрична модель може служити тільки для опису радіоактивного забруднення місцевості, але не може використовуватися для виявлення фактичних характеристик джерел радіоактивного забруднення.

Адаптація моделі може проводитися послідовно, у міру надходження даних радіаційної розвідки. Необхідність подальшої розробки цієї ідеї зумовлена потребою уточнення прогнозу РЗМ на етапі збору даних радіаційної розвідки, коли їх щільність ще недостатня для виявлення фактичного забруднення, або коли дані розвідки згруповані в компактні множини, що теж може мати місце на початкових стадіях виявлення фактичної радіаційної обстановки.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДЗЗ И ГИС

В.Н.Триснюк, А.А.Никитин, В.О.Шумейко

Статья посвящена разработке алгоритма обработки информации о радиоактивном загрязнении местности с использованием данных ДЗЗ и ГИС. Радиоактивное загрязнение местности является мощным фактором влияния на жизнедеятельность населения, работу административных структур и органов государственного управления в целом. Выявление радиоактивного загрязнения местности является первоочередной задачей ликвидации последствий радиоактивного загрязнения.

Ключевые слова: радиационной обстановки, математическая модель, ядерная энергетика, радиационная разведка.

ALGORITHM FOR PROCESSING INFORMATION ON RADIOACTIVE POLLUTION WITH THE USE OF ERS AND GIS DATA

V.N. Trysnyuk, A.A. Nikitin, V.O. Shumeyko

The article is devoted to the development of an algorithm for processing information on radioactive contamination of the terrain using remote sensing and GIS data. Radioactive contamination of the terrain is a powerful factor in influencing people's livelihoods, the work of administrative structures and public administration in general. Detection of radioactive contamination of the terrain is a top priority task to eliminate the consequences of radioactive contamination.

Keywords: radiation situation, mathematical model, nuclear power engineering, radiation prospecting.

Методика послідовної параметричної адаптації передбачає як налаштування на наявну вихідну інформацію, так і уточнення моделі РЗМ за мірою надходження даних радіаційної розвідки.

Висновки

Таким чином, метод послідовної параметричної адаптації моделі РЗМ даними радіаційної розвідки дає можливість в ряді випадків уточнювати прогноз радіоактивного забруднення і може бути використаний з метою виявлення радіаційної обстановки. Методика, яку можливо розробити на його основі, дозволить в кілька разів зменшити помилку відновлення потужності дози випромінювання. Вона може застосовуватися при щільності точок контролю значно нижче нормативних.

Запропонована методика послідовної параметричної адаптації моделі радіоактивного забруднення місцевості даними радіаційної розвідки дозволить оцінити і в ряді випадків поліпшити якість прогнозу РЗМ. Методика може бути використана при малій щільності точок розвідки, що важливо на початкових стадіях виявлення фактичної радіаційної обстановки.

Список літератури

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ.* – М.: Наука, 1986. – 544с.
2. Кармишин А.М. и др. *Радиационная обстановка в ближней зоне Чернобыльской АЭС и динамика ее изменения.* – М.: ВАНЭ, 1990. – 86 с.
3. Минзов А.С., Ужель С.В., Боголюбов О.Ю. *Разработка математических методов обработки информации о радиоактивном загрязнении местности при авариях на объектах ядерного топливного цикла.* – М.: НППЦ "Гражданская защита", 1994. – 212с.
4. *Статистическая диагностика электротехнического оборудования: Монография / С.В. Бабак, М.В. Мыслович, Р.М. Сысак.* – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – 456 с.
5. Ту Дж., Гонсалес Р. *Принципы распознавания образов* – М.: Мир, 1978. – 410с

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.С. Бутенко, Національний аерокосмічний університет імені М.С. Жуковського «ХАІ», Харків.

УДК 351.861 : 504.064:614.8

В.В. Тютюник¹, Л.Ф. Черногор², В.Д. Калугин¹, Т.Х. Агазаде¹¹ *Національний університет громадянської захисти України, Харків*² *Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В СИСТЕМЕ СОЛНЦЕ–ЗЕМЛЯ–ЛУНА НА УРОВЕНЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ЗЕМНОГО ШАРА

На основе результатов разработки подсистемы раннего обнаружения очагов сейсмической активности и прогнозирования сейсмической опасности на контролируемой локальной территории, как необходимого фрагмента структуры комплексной четырехуровневой (с учетом взаимосвязей между объектовым, городским, региональным и государственным уровнями) автоматизированной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций (ЧС), изложен механизм энергетического влияния сезонных колебаний внутреннего ядра на нестабильность в сейсмически опасных регионах земного шара.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация тектонического происхождения, раннее обнаружение очагов сейсмической активности, прогнозирование сейсмической опасности, энергетическое влияние сезонных колебаний внутреннего ядра земного шара, нестабильность в сейсмически опасных регионах, комплексная система мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Обоснование проблемы

Современные тенденции резкого увеличения количества и разрушающей силы катаклизмов [1 – 4] указывают на необходимость разработки эффективных организационно-технических мероприятий по предупреждению и ликвидации ЧС, реализуемых на основе представлений о классическом контуре управления, схематично раскрытых на рис. 1 [5 – 7], где главным фактором оценки опасности локальной территории (с динамическими геометрическими параметрами) является, в соответствии с данными рис. 2, функциональная поверхность, выпуклости которой соответствуют уровням опасности [7 – 9].

Согласно рис. 2, источник интегральной опасности в точке $A(x, y, z)$ локальной территории нелинейно объединяет источники природной опасности [10, 11]: 1' – источники атмосферного происхождения; 2' – источники биосферного происхождения; 3' – источники гидросферного происхождения; 4' – источники литосферного происхождения; источники техногенной опасности [12]: 1'' – аварии на промышленных объектах и транспорте; 2'' – взрывы; 3'' – пожары; 4'' – высвобождение других видов энергии; источники социальной опасности [13]: 1''' – психологические особенности социума и особенности воспитания; 2''' – неблагоприятное положение социума; 3''' – социальная несправедливость; 4''' – напряженность в межгрупповых, межконфессиональных и междунациональных отношениях; 5''' – негативные социальные процессы, приводящие к разрушению этических принципов и социальной стойкости социума, законопослушности; источники

военной опасности [14]: 1'''' – наличие острых противоречий, разрешение которых возможно только с применением военной силы; 2'''' – наличие у одной из сторон достаточного количества военных сил и средств для разрешения противоречия в свою пользу или способность государства создать такие силы в перспективе; 3'''' – наличие у лидеров или правительств политической воли и решимости пойти на применение силы, способности использовать вооруженные силы для разрешения возможного конфликта; 4'''' – наличие надежных союзников среди государств, их коалиций или других субъектов военно-политических отношений; 5'''' – благоприятные геополитические условия и реальная (или прогнозируемая) военно-политическая обстановка для осуществления военных акций.

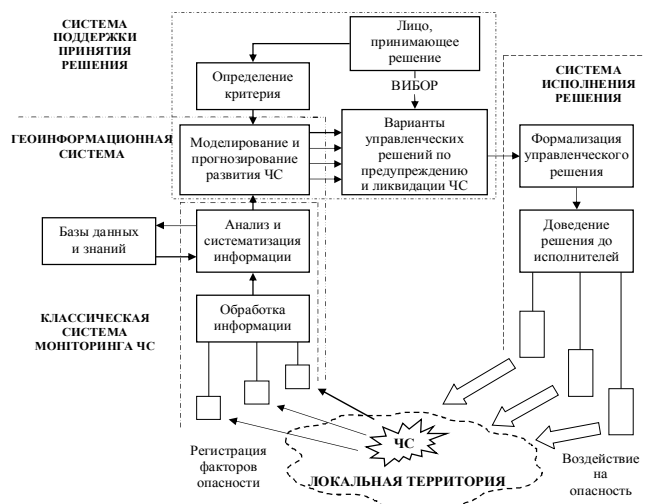


Рис. 1. Схема структуры мониторинга ЧС как средства управления

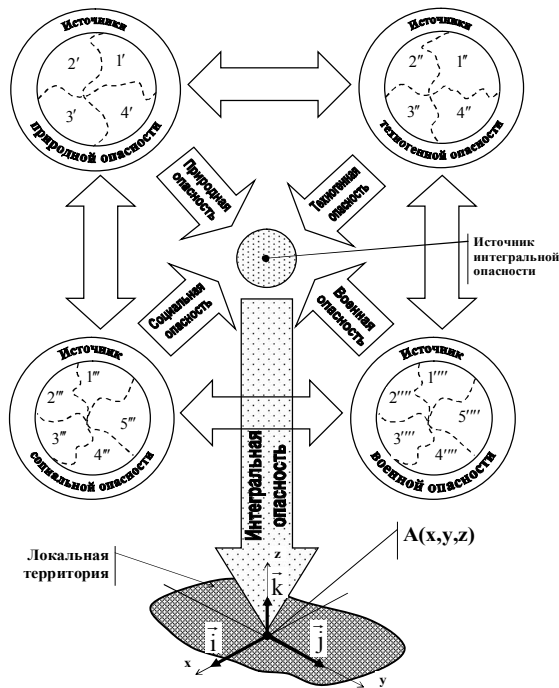


Рис. 2. Моделне представлення процесів зародження на локальній території джерел надзвичайних ситуацій різного походження

В рамках створення і подальшого розвитку відповідної чотирьохуровневої (включаючої, в відповідності з рис. 3, об'єктового, міського, регіонального і державного рівні забезпечення безпеки життєдіяльності) системи виявлення в просторі і часі факторів небезпек на етапі їх зародження і впливу на них з метою недопущення виникнення ЧС [6, 7, 15], необхідними являються наукові дослідження по вивченню кінетики і енергетики процесів виникнення, розвитку і руйнівного впливу різного роду небезпек [8, 9], які визначають перспективу даного науково-технічного напрямку.

На кожному рівні, представлена на рис. 3, система має підсистеми моніторингу ЧС, пов'язані з природною, техногенною і соціальною специфікою рівня захисту, і функціонує шляхом подальшої передачі обробленої інформації про ступінь небезпек від об'єктового рівня до державному з допомогою підсистем зв'язу відповідних рівнів і прийняття на кожному рівні антикризисних рішень. Підсистема моніторингу ЧС на відповідному рівні включає (інформація представлена на прикладі підсистеми 1.1 об'єктового рівня): 1.1.1 – ЧС об'єктового рівня; 1.1.2 – підсистема контролю передшествуючих факторів ЧС об'єктового рівня; 1.1.3 – центр збору і обробки фактичної інформації, прогнозування ЧС і розробки антикризисних рішень об'єктового рівня; 1.1.5 – підсистема зв'язу об'єктового рівня; 1.1.6 – керівництво об'єкта; 1.1.7 – Рада з питань безпеки об'єкта;

1.1.8 – підсистема доведення інформації до підрозділів реагування на ЧС об'єктового рівня і до підрозділів охорони правопорядку; 1.1.9 – підсистема життєзабезпечення об'єкта.

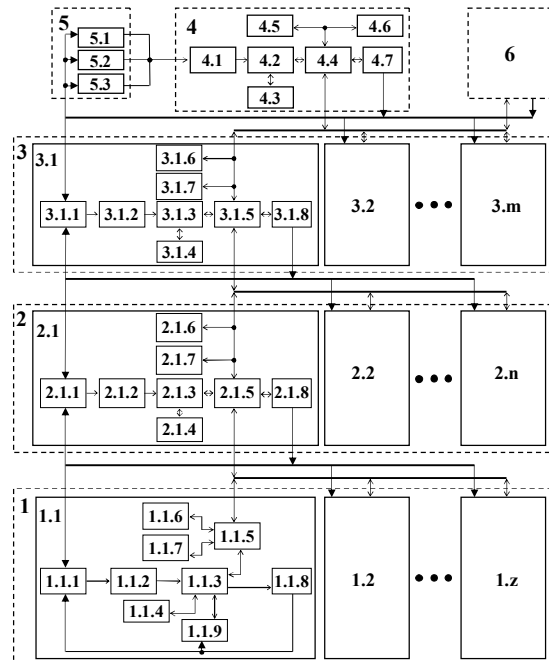


Рис. 3. Комплексна функціональна схема системи моніторингу різного роду надзвичайних ситуацій: 1 – підсистема об'єктового рівня; 2 – підсистема міського рівня; 3 – підсистема регіонального рівня; 4 – підсистема державного рівня; 5 – ЧС різного (природного, техногенного, соціального і воєнного) походження, виникаючі поза державою; 6 – системи моніторингу ЧС держав-членів ООН

На кожному рівні в режимі повсякденного функціонування, режимі підвищеної готовності і режимі надзвичайного стану в системі автоматизовано здійснюються: 1) обробка отриманої фактичної інформації про ступінь небезпек від нижнього рівня і інформації з територіальної підсистеми моніторингу ЧС даного рівня; 2) прогноз можливості виникнення ЧС; 3) розробка пропозицій по попередженню і ліквідації осередків небезпек на даному і нижньому рівнях, а також необхідності залучення додаткових сил і засобів попередження і ліквідації ЧС на вищих рівнях; 4) передача інформації на вищий рівень, включаючи державний.

На державному рівні функції системи моніторингу ЧС орієнтовані на аналіз інформації, що надходить як з регіональних підсистем моніторингу, так і територіальної державної підсистеми моніторингу ЧС, контролюючої осередки небезпек в околотериторії, ближньому і дальньому космосі, в недрах Землі, в інших державах, які можуть представляти небезпеку для території розглянутого державства.

В рамках обозначенных перспектив научных исследований в сфере гражданской защиты на государственном уровне обеспечения безопасности жизнедеятельности, данная работа направлена на исследование влияния процессов внутри земного шара, как одной из составляющей энергетически открытой динамической системы Солнце – Земля – Луна, на территориально-временное распределение количества возникновения ЧС тектонического характера.

Анализ последних достижений и публикаций.

Анализ научной литературы с глубиной поиска около десяти лет указывает, что среди ряда направлений научных исследований по прогнозированию опасных тектонических процессов особый интерес составляют:

- исследования, направленные на изучение связи между глобальными свойствами сейсмической активности Земли с ее осевым вращением [16, 17];

- исследования, направленные на изучение причин возникновения сейсмической опасности, вызванные пространственно-колебательными перемещениями внутреннего ядра Земли и его воздействия на оболочку земного шара [18, 19].

Так, высказанные в работе [18] представления о взаимосвязи сейсмической активности земного шара с процессами в ее недрах указывают на то, что изменение сейсмичности локальной территории осуществляется за счет годового перемещения центра ядра относительно центра земного шара (рис. 4).

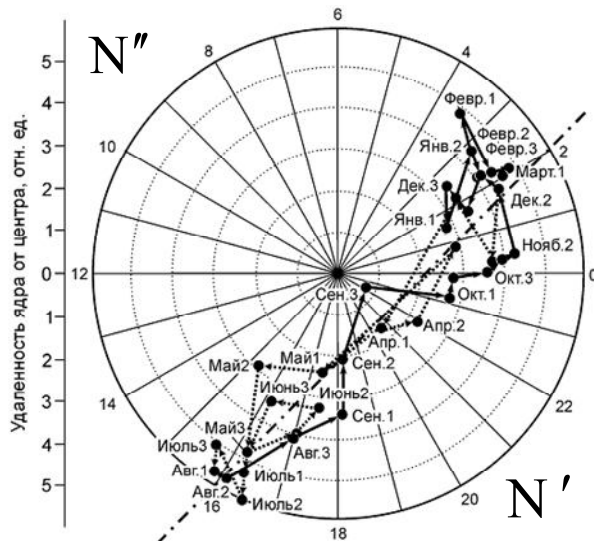


Рис. 4. Траектория движения ядра внутри Земли в течение года (вид со стороны полюса) [18]: N' и N'' – полушария относительно плоскости движения ядра (2 – 16 временных поясов)

Представленные в работах [16, 17] результаты направлены на нахождение статистическими методами корреляции между глобальными свойствами сейсмической активности Земли (распределение количества землетрясений между северным, южным, восточным и западным полушариями) и угловою скоростью и угловым ускорением вращения планеты.

Авторами проведен корреляционный анализ данных о землетрясениях за период 1964 – 2008 гг., представленных Национальным информационным центром по землетрясениям Геологической службы США [17]. Результатом данного направления исследований стало допущение о существовании двух классов динамических факторов, определяющих изменение сейсмичности в больших тектонических структурах [1, 20 – 23]: глобальный механизм, определяющий изменение во времени общее количество сильных землетрясений; механизм, вызывающий изменение напряженности на стыках тектонических плит.

Формулирование цели статьи. Исходя из выше представленного, необходимо объединение проанализированных представлений о воздействии кинетики внутренних физико-химических процессов земного шара на процесс генерирования ЧС тектонического происхождения с целью оценки сейсмической активности выбранной локальной территории земного шара. Сформулированный нами подход к изучению природы систематических явлений является важным инструментом анализа при проведении данных исследований.

Изложение основного материала исследования

Процессы, протекающие в системе Солнце–Земля–Луна и влияющие на уровень сейсмической опасности функционирования локальной территории, схематически возможно представить в соответствии с рис. 5 – 7 и охарактеризовать следующими факторами.

1. Ось вращения Земли описывает на небесной сфере сложную волнообразную траекторию, точки которой находятся на угловом расстоянии в среднем около $23,5^\circ$ от полюса эклиптики (рис. 5). Вершина конуса совпадает с центром Земли. Точки равноденствий и солнцестояний движутся по эклиптике навстречу Солнцу. Моменты сил притяжения, которые действуют на экваториальные вздутия, меняются в зависимости от положений Луны и Солнца по отношению к Земле. Когда Луна и Солнце находятся в плоскости земного экватора, моменты сил исчезают, а когда склонения Луны и Солнца максимальны, то и величина момента сил наибольшая. Вследствие колебаний моментов сил тяготения наблюдаются нугации оси вращения Земли, которые складываются из ряда небольших периодических колебаний. Главнейший из них имеет период 18,6 года – время обращения узлов орбиты Луны. Движение с этим периодом происходит по эллипсу. Большая ось эллипса перпендикулярна направлению прецессионного движения и равна $18,4^\circ$; малая – параллельна ему и равна $13,7^\circ$. Далее по величине амплитуды идут составляющие с периодом 0,5 года, 13,7 сут., 9,3 года, 1 год, 27,6 сут. и т.д., поэтому траектория имеет вид «тонких кружков» (показано на увеличенном фрагменте в левой части рис. 5) [16, 17, 24 – 28].

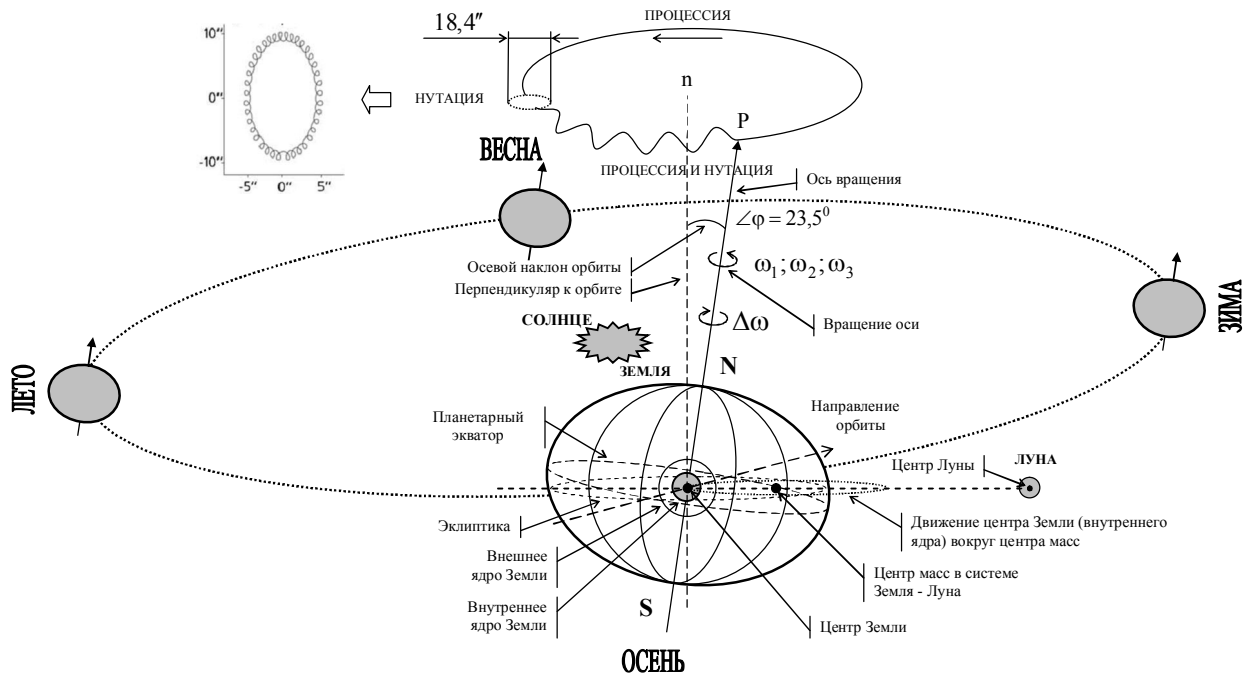


Рис. 5. Схема движения внутреннего ядра Земли в системе Солнце – Земля – Луна

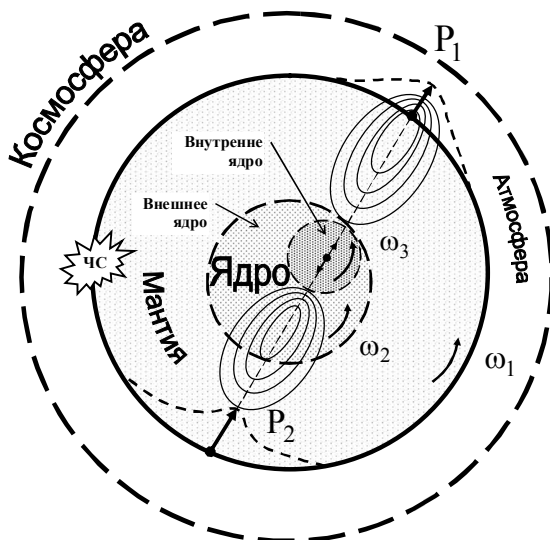


Рис. 6. Схема влияния колебаний внутреннего ядра на сейсмическую активность

2. В результате эксцентрического обращения оболочки Земли вокруг смещенного внутреннего ядра возникает давление со стороны твердого внутреннего ядра и окружающего расплава (внешнего ядра) на мантию, которое выдавливает оболочку изнутри. В других частях планеты возникают силы, сжимающие оболочку шара, втягивая ее внутрь к ядру. Данный процесс имеет две составляющие: воздействие за счет годового перемещения центра ядра относительно центра земного шара (рис. 4 – 7); воздействие за счет эксцентрического обращения ядра относительно нижней мантии, когда за счет разницы в угловых скоростях обращения ядра и нижней мантии (ω_1 – угловая скорость вращения мантии; ω_2 – угловая скорость вращения внешне-

го ядра; ω_3 – угловая скорость вращения внутреннего ядра; $\Delta\omega$ – угловая скорость поворота внешнего ядра относительно мантии («западный дрейф»)) возникают зоны повышенного давления и разряжения ($P_1 \neq P_2$, где P_1 и P_2 – показатели давления внутреннего ядра земного шара на ее поверхность), влияющие на уровень сейсмической активности поверхности земного шара (рис. 6). Существование таких зон будет поддерживаться до тех пор, пока существует разница в угловых скоростях обращения и смещения ядра.

3. В процессе перемещения литосферных плит (рис. 7) возникают внутренние упругие напряжения, представляющие собой источники землетрясений Z_0 [29 – 33].

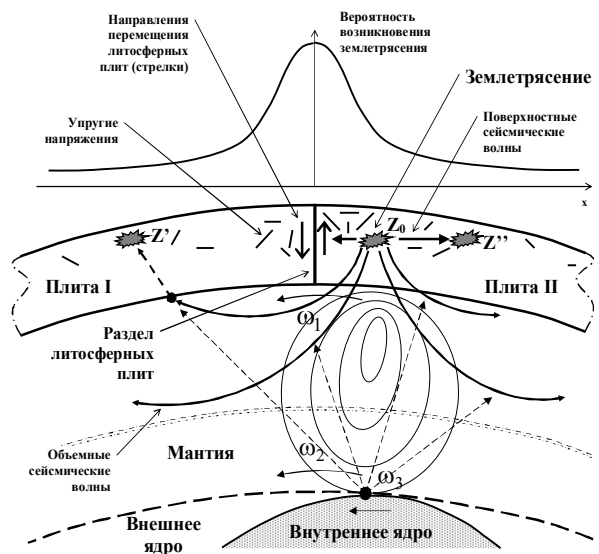


Рис. 7. Схема процесса возникновения землетрясений и распространения сейсмической активности

Глубина возникновение упругого напряжения зависит от перемещения плит. Относительное движение литосферных плит приводит к возникновению неглубоких (не глубже 20 – 25 км) источников землетрясений, а окунание литосферных плит в мантию провоцирует появление источников глубоких (превышающих 70 км) землетрясений. Увеличение расстояния от разделения литосферных плит характеризуется уменьшением вероятности возникновения упругих напряжений.

4. Факторами распространения опасности от землетрясения Z_0 выступают поверхностные и объемные сейсмические волны [30, 33, 34].

5. В процессе пространственно-колебательного перемещения внутреннего ядра Земли и его влияния на внешнее ядро возникает вероятность взаимного усиления или ослабления объемных сейсмических волн и возможность возникновения вторичных землетрясений Z' [35, 36].

6. Не исключена возможность воздействия поверхностных и объемных сейсмических волн на напряженности в литосфере, возникшие вблизи землетрясения и провоцирующие возникновение цепной реакции распространения сейсмической опасности Z'' [22, 23, 36 – 39].

7. Кроме того, следствием движения внутреннего ядра Земли являются территориально-временные изменения интенсивности естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), провоцирующие аномальные процессы в атмосфере [18, 19, 22, 23, 33, 40 – 45].

На основе результатов анализа данных рис. 4 – 7 нами сформулированная задача, включающая установление, по данным Главного центра специального контроля Государственного космического агентства Украины [46], взаимосвязи между уровнем сейсмической активности земного шара и про-

странственно-колебательным перемещением его внутреннего ядра. В связи с последними данными о природе ЕИЭМПЗ нами проведены исследования, направленные на поиск взаимосвязи между движением внутреннего ядра и территориально-временным распределением количества землетрясений.

Пример анализа данных за июль в период 2004 – 2016 гг. о колебаниях естественного импульсного электромагнитного поля Земли представлен на рис 8, а. Обработаны и обобщены нами по количеству и энергетическим показателям данные, обнародованные в [46], о землетрясениях на земном шаре, приведенные на рис. 8, б и 8, в. Обработанные по данной схеме ежемесячно за период 2004 – 2016 гг. результаты позволяют высказать следующее:

- территориальное перемещение внутреннего ядра в плоскости между вторым и шестнадцатым часовыми поясами приводит к перемещению диаграммы территориального распределения интенсивности ЕИЭМПЗ. Территориальное нахождение центра внутреннего ядра определяет направление большего значения интенсивности ЕИЭМПЗ (рис. 8, а);

- сезонные перемещения земного шара, а соответственно и перемещения внутреннего ядра, приводят к сезонным вариациям интенсивности ЕИЭМПЗ. Максимальная интенсивность поля для северного полушария наблюдается в летние месяцы. Минимальная интенсивность наблюдается в зимние месяцы [18, 19, 22, 23, 35];

- территориально-временное движение внутреннего ядра земного шара влияет на территориальное распределение возникновения землетрясений на планете. Диаграммы распределения числа землетрясений и их энергетических показателей лежат в экваториальной плоскости, перпендикулярной плоскости движения внутреннего ядра, и представлены на рис. 8, б и 8, в.

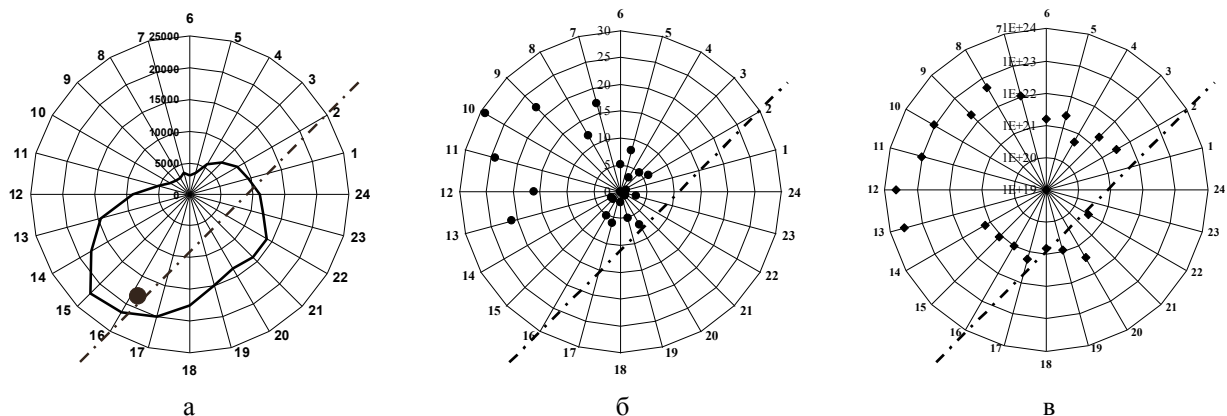


Рис. 8. Пример обобщенного по часовым поясам территориального распределения проявления следующих явлений, возникших в июле в период 2004 – 2016 гг. (вид со стороны полюса):

а – интенсивности естественного импульсного электромагнитного поля Земли [имп./ч] (точкой отмечено схематическое расположение центра внутреннего ядра земного шара)

б – количества землетрясений с магнитудой $M \geq 5$, в – величины суммарной за анализируемый период энергии землетрясений [Дж]

Обобщенные территориально-временного распределения значимых землетрясений по земному шару за период 2004 – 2016 гг. представлены в табл. 1, а также – в графическом виде на рис. 9, и указывают на существование влияния от движения внутреннего ядра на распределение землетрясений. Это, на наш взгляд, определяется законом перераспределения энергии воздействия внутреннего ядра (в процессе его движения (рис. 4 – 8)) на тектонические процессы, которые протекают в оболочке планеты.

Так, по данным рис. 9 – 12 возможно заключить, что в периоды обращения Земли вокруг Солнца, когда внутреннее ядро максимально удаляется от центра Земли и максимально приближается к ее оболочке, происходит максимальное энергетическое влияние внутреннего ядра на колебания тектонических плит оболочки планеты. Это обусловлено, как показано на рис. 6, появлением зон повышенного давления и разряджения ($P_1 \neq P_2$). Увеличение неравномерного дав-

ления внутреннего ядра Земли на оболочку планеты приводит к повышению ее сейсмической активности на стыках геологических плит. Это обстоятельство обусловлено появлением, в условиях неравенства угловых скоростей $\omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega_3$, вращательного движения зон давления внутреннего ядра на оболочку планеты вокруг оси вращения Земли, а следовательно территориально-временного перемещения давления внутреннего ядра Земли по различным участкам геологических плит, что приводит к активации разностного перемещения плит, появлению дополнительных, вдоль раздела геологических плит, упругих напряжений и увеличению вероятности возникновения землетрясения (рис. 6 и 7) Особенно, как показано на рис. 11 и 12, этот эффект проявляется в полусфере N'', полученной, в соответствии с подходом, представленном на рис. 4, при условном разделении сферы Земли плоскостью движения ее внутреннего ядра. В полусфере N' этот эффект также имеет место.

Таблица 1

Обобщенные результаты территориально-временного распределения землетрясений с магнитудой $M \geq 5$ по земному шару в период 2004 – 2016 гг.

	Зима			Весна			Лето			Осень		
	Де-кабрь	Ян-варь	Фев-раль	Март	Ап-рель	Май	Июнь	Июль	Ав-густ	Сен-тябрь	Ок-тябрь	Но-ябрь
Положение внутр. ядра (по данным рис. 4)	2	3	4	2,5	-1	-2	-3	-4,5	-5	-3	-0,5	0,5
Общее количество землетрясений (N_{Σ})	205	198	211	293	268	201	189	203	228	223	199	244
Величина суммарной разрушающей энергии от землетрясений (E_{Σ} , Дж)	$2 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$5 \cdot 10^{24}$	$2 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$4 \cdot 10^{24}$	$2 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$
N'	34	39	54	50	52	44	45	31	48	54	38	60
E' , Дж	$2 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{23}$	$4 \cdot 10^{24}$	$3 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{23}$	$7 \cdot 10^{22}$	$4 \cdot 10^{23}$	$3 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{24}$	$9 \cdot 10^{22}$	$6 \cdot 10^{22}$
N''	171	159	157	243	210	157	144	172	180	169	161	184
E'' , Дж	$1 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$2 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$3 \cdot 10^{24}$	$1 \cdot 10^{24}$	$7 \cdot 10^{23}$
$\alpha_N = N''/N'$	5,03	4,08	2,91	4,86	4,04	3,58	3,20	5,55	3,75	3,13	4,24	3,07
$\alpha_E = E''/E'$	7,14	10,72	0,33	48,26	8,04	13,49	15,28	29,96	3,18	1,86	16,05	1,30

Кроме того, по данным рис. 9 – 12, подобный эффект энергетического влияния внутреннего ядра на сейсмическую активность земного шара проявляется при нахождении ядра в центре планеты. Взаимосвязь между количествами землетрясений N' и

N'' с магнитудой $M \geq 5$, по данным табл. 1, за период 2004 – 2016 гг. представлены в виде отношения $\alpha_N = N''/N'$ и в графическом виде на рис. 13. Представленная графическая зависимость указывает на су-

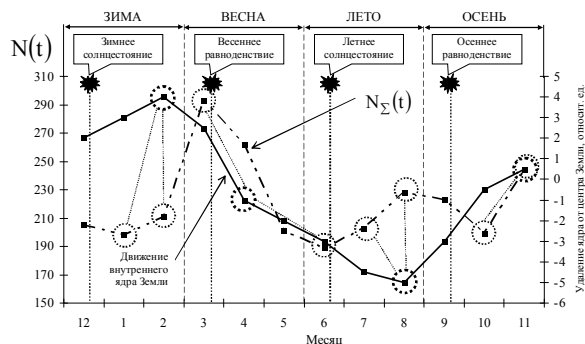


Рис. 9. Обобщенная по земному шару динамика суммарной сейсмической активности $N_{\Sigma}(t)$ магнитудой $M \geq 5$ в течение года за период 2004 – 2016 гг.

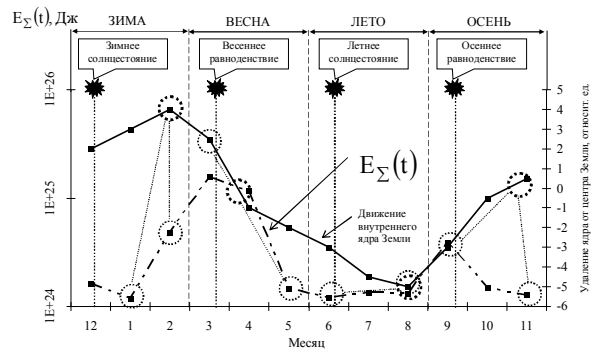


Рис. 10. Обобщенная по земному шару динамика суммарной разрушающей энергии E_{Σ} от землетрясений с магнитудой $M \geq 5$ в течение года за период 2004 – 2016 гг.

ществовање четко выраженных сезонных колебаний показателя взаимосвязи $\alpha_N(t) - T_p = 3$ месяца.

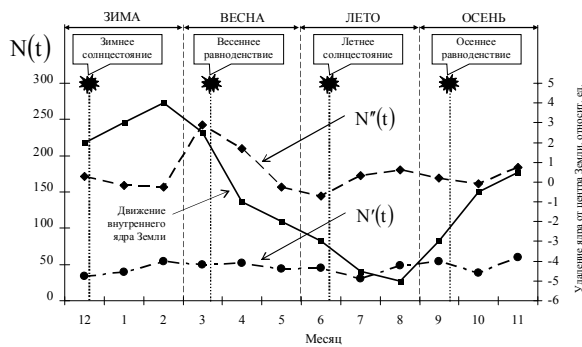


Рис. 11. Обобщенная динамика сейсмической активности $N'(t)$ и $N''(t)$ с магнитудой $M \geq 5$ в течение года за период 2004 – 2016 гг.

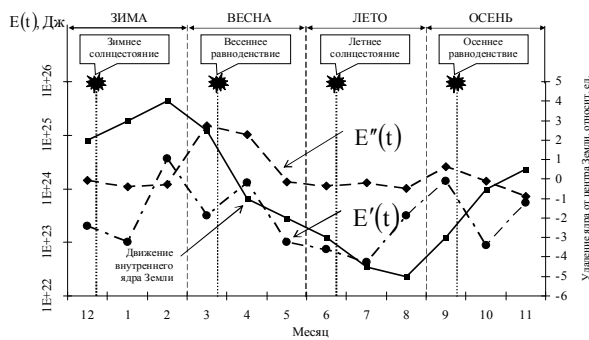


Рис. 12. Обобщенная динамика разрушающей энергии $E'(t)$ и $E''(t)$ от землетрясений с магнитудой $M \geq 5$ в течение года за период 2004 – 2016 гг.

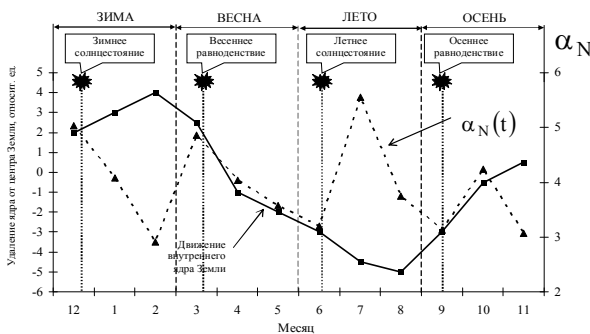


Рис. 13. Графическое представление связи между изменениями α_N и движением внутреннего ядра относительно центра земного шара

Взаимосвязь между перераспределением разрушающей энергии $E'(t)$ и $E''(t)$ от землетрясений с магнитудой $M \geq 5$, по данным табл. 1, за период 2004 – 2016 гг. представлены в виде отношения $\alpha_E = E''/E'$ и в графическом виде на рис. 14. Представленная графическая зависимость также указывает на существование четко выраженных сезонных колебаний показателя взаимосвязи $\alpha_E(t) - T_p = 1$ месяца. При этом, максимальная амплитуда колебаний показателя α_E , в отличие от зимнего периода приходится на середину сезонного периода.

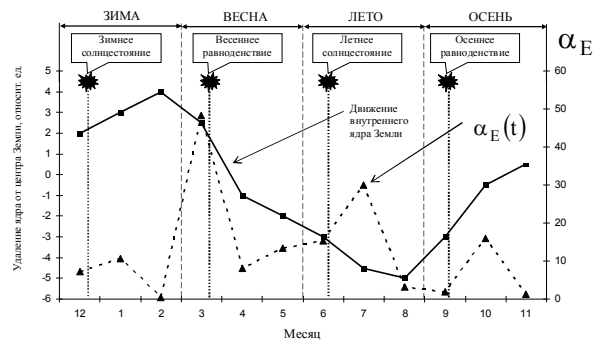


Рис. 14. Графическое представление связи между изменениями α_E и движением внутреннего ядра относительно центра земного шара

Кроме того, необходимо зафиксировать факт соответствия максимально-сезонных значений показателей $\alpha_N(t)$ и $\alpha_E(t)$ периодам зимнего солнцестояния и весеннего равноденствия. В периоды же летнего солнцестояния и осеннего равноденствия показатели $\alpha_N(t)$ и $\alpha_E(t)$ принимают минимальные в данный сезон значения. Данное обстоятельство на наш взгляд обусловлено спецификой сезонного движения внутреннего ядра Земли в системе Солнце – Земля – Луна при определенном угле наклона оси вращения земного шара (рис. 5). Таким образом, представленные на рис. 13 и 14 результаты указывают на существование характеристических положений в движении внутреннего ядра, которые соответствуют экстремумам в динамике показателей $\alpha_N(t)$ и $\alpha_E(t)$. Этими характерными положениями в движении внутреннего ядра выступают сезонные процессы приближения и удаления центров внешнего и внутреннего ядер, в условиях проявления трех основных факторов: закономерного движения Земли вокруг Солнца; разности в угловых скоростях вращения ядер и мантии земного шара; проявления процессии и нутации в движении Земли при закономерной динамике центра масс системы Земля – Луна. Полученные результаты (рис. 9 – 14) является основой для дальнейших исследований, связанных с установлением энергетической связи между уровнем нестабильности в интересующей сейсмически опасной локальной территории и территориально-временным распределением землетрясений по всему земному шару, как интегральной природно-техногенно-социальной системы.

Выводы

1. Показано, что создание комплексной четырехуровневой (с учетом взаимосвязей между объектовым, городским, региональным и государственным уровнями) автоматизированной системы мониторинга ЧС, с подсистемой раннего выявления очагов сейсмической активности и прогнозирования сейсмической опасности по земному шару, является необходимым для обеспечения соответствующего уровня сейсмической безопасности функционирования контролируемой локальной территории.

2. Установлено, что основой подсистемы раннего обнаружения очагов сейсмической активности и прогнозирования сейсмической опасности на контролируемой локальной территории является классический контур управления, обеспечивающий сбор, обработку и анализ информации, а также моделирование развития сейсмической опасности по земному шару.

3. При разработке системного подхода для прогнозирования процессов возникновения ЧС тектонического происхождения разработан механизм энергетического влияния сезонных колебаний ядра земного шара на интенсивность естественного импульсного электромагнитного поля Земли и нестабильность в сейсмически опасных регионах.

4. На основе разработанного механизма эксцентричного равномерного поступательно-вращающегося динамического движения внутреннего ядра земного шара рассмотрена возможность установления периодической осцилляции сейсмического состояния земного шара.

5. На основе полученных результатов помесечного территориально-временного распределения интенсивности естественного импульсного электромагнитного поля Земли и сейсмической активности по поверхности земного шара относительно трассы движения ее внутреннего ядра установлено сезонное перераспределение энергетического влияния внутреннего ядра на уровень сейсмической активности сейсмически нестабильных территорий земного шара. Результаты обработки количества землетрясений по поверхности земного шара указали на наличие асимметричного распределения ЧС тектонического происхождения по поверхности Земли.

Список литературы

1. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф / Л.Ф. Черногор – Х.: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2012. – 556 с.
2. Осипов В.И. Природные опасности и стратегические риски в мире и в России / В.И. Осипов // Экология и жизнь. – 2009. – № 11 – 12 (96 – 97). – С. 5 – 15.
3. Природные катастрофы и окружающая среда / В.Г. Бондур, В.Ф. Крапивин, И.И. Потапов, В.Ю. Солдатов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2012. – №1. – С. 3 – 150
4. Природні та техногенні загрози, оцінювання небезпек / В.А. Андронов, А.С. Рогозін, О.М. Соболев, В.В. Тютюник, Р.І. Шевченко – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2011. – 264 с.
5. Кодекс цивільного захисту України від 2 жовтня 2012 року № 5403-VI // Голос України. – 2012. – листопад (№ 220 (5470)). – С. 4 – 20.
6. Розробка науково-технічних основ для створення системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС імені Івана Кожедуба, 2013. – Вип. 9(116). – С. 204 – 216.
7. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій

в Україні: Монографія / В.А. Андронов, М.М. Дівізінюк, В.Д. Калугін, В.В. Тютюник. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2016. – 319 с.

8. Тютюник В.В. Системний підхід до оцінки небезпеки життєдіяльності при територіально часовому розподілі енергії джерел надзвичайних ситуацій / В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, В.Д. Калугін // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: Національний університет цивільного захисту України, 2011. – Вип. 14. – С. 171 – 194.

9. Системний підхід до оцінки ризиків надзвичайних ситуацій в Україні / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 1/6 (55). – С. 59 – 70.

10. Черногор Л.Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография / Л.Ф. Черногор – Харьков: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2008. – 528 с.

11. Тютюник В.В. Аналіз факторів, які провокують виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2011. – Вип. 4(94). – С. 280 – 284.

12. ГОСТ Р 22.0.05-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.fireman.ru/bd/gost/22-0-05/22-0-05-94.htm#n_3_1_2

13. Михайлов Л.А. Чрезвычайные ситуации природного, техногенного и социального характера и защита от них / Л.А. Михайлов, В.П. Соломин – СПб.: Питер, 2008. – 235 с.

14. Лінкан В.А. Національна безпека України / В.А. Лінкан [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://westudents.com.ua/knigi/368-natsionalna-bezpeka-ukrani-lpkan-va.html>

15. Тютюник В.В. Використання енергетичного підходу для оцінки ефективності функціонування комплексної автоматизованої системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій на локальній території / В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, В.Д. Калугін // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС імені Івана Кожедуба, 2016. – Вип. 1(138). – С. 183 – 194.

16. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. – М.: Наука, Физматлит, 2002. – 384 с.

17. Клименко А.В. Глобальные свойства сейсмической активности Земли и их связь с ее вращением / А.В. Клименко // Диссер. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: Московский государственный областной университет, 2005. – 87 с.

18. Мальшиков Ю.П. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра Земли / Ю.П. Мальшиков, С.Ю. Мальшиков // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 2. – С. 152 – 172.

19. Способ определения пространственного положения и параметров движения внутреннего ядра Земли / Ю.П. Мальшиков, С.Ю. Мальшиков, С.Г. Шталин [и др.] // Институт мониторинга климатических и экологических систем. – Патент РФ № 2352961, МПК G01V3/00

20. Касахара К. Механика землетрясений / К. Касахара. – М.: Мир, 1985. – 264 с.

21. Фридман А.М. О некоторых корреляциях в сейсродинамике и двух компонентах сейсмической активности Земли / А.М. Фридман, Е.В. Поляченко, Н.Р. Насырканов // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, № 3. – С. 303 – 312.

22. Тютюник В.В. Оцінка територіально-часового розподілу кількості землетрусів по земній кулі / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін, Л.Ф. Черногор // Геоінформатика – Київ: Інституту геологічних наук НАН України, 2012. – № 4(44) – С. 53 – 60.

23. Оцінка співвідношення між рівнями сейсмічної небезпеки півкуль земної кулі / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Чорного, Р.І. Шевченко // Системи обробки інформації – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2012. – Вип. 7(105). – С. 277 – 287
24. Левин Б.В. Свойства «критических широт», вариации вращения и сейсмичность Земли / Б.В. Левин, Е.В. Сасорова, А.В. Доманский // Вестник ДВО РАН. – 2013. – № 3. – С. 3 – 8.
25. О корреляции графиков угловой скорости вращения Земли и модуля ее временной производной с частотой землетрясений в зависимости от их магнитуды / Н.Н. Горькавый, Л.С. Левицкий, Т.А. Тайдакова, Ю.А. Трапезников, А.М. Фрийдман // Физика Земли. – 1994. – № 10. – С. 33 – 38.
26. Сидоренков Н.С. Нестабильность вращения Земли / Н.С. Сидоренко // Вестник РАН. – 2004. – Т. 74. – № 8. – С. 701 – 715.
27. Zharov V.E. Connection of the Earth's rotation with the atmospheric angular momentum and the strongest earthquakes / V.E. Zharov // Astron. Astrophys. Transactions. – 1996. – V.9. – P. 317 – 327.
28. Wiemer S. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes: An overview / S. Wiemer, M. Wyss // Advances in Geophysics. – 2002. – V.45. – P. 259 – 302.
29. Райс Дж. Механика очага землетрясения / Дж. Райс. – М.: Мир, 1982. – 217 с.
30. Касахара К. Механика землетрясений / К. Касахара. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
31. Трухин В.И. Общая и экологическая геофизика / В.И. Трухин, К.В. Показеев, В.Е. Куницын. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.
32. Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты / И.Л. Гуфельд. – Королев, М.О.: ЦНИИМаш, 2007. – 160 с.
33. Березняков А.И. Фізика Землі / А.И. Березняков, К.А. Немець. – Харків: Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 2010. – 268 с.
34. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны / Е.Ф. Саваренский. – М.: Недра, 1972. – 296 с.
35. Способ прогноза землетрясений / Ю.П. Малышков, К.Б. Джумабаев, С.Ю. Малышков [и др.] // Институт мониторинга климатических и экологических систем. – Патент РФ № 2238575, МПК G01V3/00, 20.10.2004
36. Тютюник В.В. Дослідження механізму цепного розвитку процесу розповсюдження нестабільності у сейсмічно небезпечних регіонах Землі / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін // Системи обробки інформації – Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. – Вип. 1(30). – С. 178 – 184.
37. Пишеников К.В. Механизм возникновения афтершоков и неупругие свойства земной коры / К.В. Пишеников. – М.: Наука, 1965. – 87 с.
38. Гульельми А.В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф / А.В. Гульельми // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185. – № 4. – С. 415 – 429.
39. Левин Б.В. Великое Японское землетрясение / Б.В. Левин, М.В. Родкин, И.Н. Тихонов // Природа. – 2011. – № 10. – С. 14 – 22.
40. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М.А. Садовского. – М.: Наука, 1982. – 69 с.
41. Ремизов Л.Т. Регистрация измененной естественно-го электромагнитного поля в периоды времени, предшествующие землетрясениям / Л.Т. Ремизов // Радиотехника и электроника – 1991. – Т. 36. – № 6. – С. 1041 – 1080.
42. Тертышников А.В. Предвестники сильных землетрясений в озоносфере / А.В. Тертышников // Гелиогеофизические исследования. – 2012. – Вып. 2. – С. 54 – 59.
43. Aframovich E.L. The shock-acoustic waves generated by the earthquakes / E.L. Aframovich, N.P. Perevalova, A.V. Plotnikov, A.M. Uralov // Annales Geophysicae. – 2001. – V.19. – N.4. – P. 395 – 409.
44. Garcia R. Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data / R. Garcia, F. Crespon, V. Ducic, P. Lognonne // Geophys. J. Int. – 2005. – V.163. – P. 1049 – 1064.
45. Heki K. Directivity and apparent velocity of the coseismic traveling ionospheric disturbances observed with a dense GPS array / K. Heki, J. Ping // Earth Planet. Sci. Lett. – 2005. – V.236. – P. 845 – 855.
46. Дані Головного центру спеціального контролю по землетрусам Національного космічного агентства України [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.nkau.gov.ua/nsau/zemltrus.nsf>

Надійшла до редколегії 23.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЕФЕКТІВ У СИСТЕМІ СОНЦЕ–ЗЕМЛЯ–МІСЯЦЬ НА РІВЕНЬ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ ТЕРИТОРІЇ ЗЕМНОЇ КУЛІ

В.В. Тютюник, Л.Ф. Чорного, В.Д. Калугін, Т.Х. Агазаде

На основі результатів розробки підсистеми раннього виявлення джерел сейсмічної активності та прогнозування сейсмічної небезпеки на контрольованій локальній території, як необхідного фрагменту структури комплексної чотирьохрівневої (з урахуванням взаємозв'язків між об'єктовим, місцевим, регіональним та державним рівнями) автоматизованої системи моніторингу надзвичайних ситуацій, викладено механізм енергетичного впливу сезонних коливань внутрішнього ядра на нестабільність у сейсмічно небезпечних регіонах земної кулі.

Ключові слова: надзвичайна ситуація тектонічного походження, раннє виявлення джерел сейсмічної небезпеки, прогнозування сейсмічної небезпеки, енергетичний вплив сезонних коливань внутрішнього ядра земної кулі, нестабільність у сейсмічно небезпечних регіонах, комплексна система моніторингу надзвичайних ситуацій

ASSESSMENT OF INFLUENCE POWER EFFECTS IN SYSTEM THE SUN-EARTH-MOON ON THE LEVEL OF SEISMIC ACTIVITIES THE TERRITORY OF THE GLOBE

V.V. Tiutiunyk, L.F. Chernogor, V.D. Kalugin, T. Agazade

On the basis results development subsystem of early detection centers seismic activity and seismic prediction danger in the controlled local territory as necessary fragment structure complex four-level (taking into account interrelations between object, city, regional and state levels) the automated system monitoring emergency situations, the power mechanism influence of seasonal fluctuations internal core on instability in seismically dangerous regions of the globe has been explained.

Keywords: tectonic origin emergency situation, early detection seismic activity centers, seismic prediction danger, core globe internal fluctuations of seasonal influence power, instability in seismically dangerous regions, the complex system monitoring emergency situations

УДК 515.2

І.А. Чуб¹, М.В. Новожилова², М.Ю. Карпенко²¹ Національний університет цивільного захисту України, Харків² Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків

МЕТОД МІНІМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З МОЖЛИВИМИ ВИКИДАМИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ

Представлені математична модель та метод розв'язання задачі мінімізації впливу надзвичайної ситуації з можливими викидами небезпечних хімічних речовин в атмосферу шляхом раціонального розміщення хімічно небезпечних об'єктів в заданій області з урахування її кліматичних умов.

Ключові слова: метод мінімізації, хімічно небезпечні речовини, оптимальне розміщення об'єктів.

Вступ

Одним з пріоритетних напрямків соціально-економічної політики України є посилення техногенної безпеки промислових об'єктів. Аналіз надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру, що сталися за останні десять років на території України, показав, що значний внесок в рівень техногенної безпеки території вносять аварії на промислових та інших об'єктах, які супроводжуються викидами небезпечних хімічних речовин (НХР).

За розмірами негативного екологічного впливу, а також ступеню загрози здоров'ю та життю людей, найбільшу небезпеку представляють підприємства нафтохімічної, хімічної промисловості тощо, які розташовані у густонаселених районах [1–3]. Аварії на цих об'єктах майже завжди є екологічними катастрофами.

На сьогоднішній день в Україні відсутня затверджена методика оцінки негативного впливу на навколишнє середовище небезпечних чинників можливої хімічної аварії та методів його зниження, хоча їх необхідність закладена в ряді нормативно-правових документів.

Одним з дійових методів зниження негативного впливу НС з викидом НХР на хімічно небезпечних промислових об'єктів на етапах розробки планів на нове будівництво, розширення, реконструкцію і технічне переоснащення є їх оптимальне розміщення з урахуванням особливостей НХР та природно-кліматичних умов [4–6].

Тому розробка математичної моделі і методу мінімізації впливу НС з викидом НХР в атмосферу шляхом оптимізації розміщення хімічно небезпечних промислових об'єктів є актуальною науковою задачею.

Основна частина

Нехай у заданій області $\mathfrak{R} \subset \mathbb{R}^2$, пов'язаній з загальною системою координат ХОУ, розміщуються

N хімічно небезпечних об'єктів S_i ($i = 1, 2, \dots, N$), які у випадку НС є джерелами викиду НХР. З кожним об'єктом S_i , що розміщується, зв'язана власна система координат $X_iO_iY_i$.

В області \mathfrak{R} розташовуються ділянки, що є зонами заборони K_j ($j=1, 2, \dots, J$), у яких присутність об'єктів S_i не допускається.

Тому розміщення об'єктів S_i здійснюється в підобласті Ω області \mathfrak{R} :

$$\Omega = (\mathfrak{R}^* \setminus \bigcup_{j=1}^P K_j^*).$$

Розміщення об'єктів S_i здійснюється з урахуванням геокліматичних факторів Q (напряму і швидкості вітру) в області. При цьому вважається, що область Ω розташована на рівнинній місцевості і її межам напрям та швидкість вітру не змінюються.

Місце розташування множини N об'єктів S_i в області Ω визначається вектором Z параметрів розміщення

$$Z = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N), Z \in \mathbb{R}^{2N},$$

де (x_i, y_i) – координати полюса об'єкта S_i – довільної точки у межах S_i , яка є началом власної системи координат $X_iO_iY_i$, зв'язаної з об'єктом S_i .

Кількісною характеристикою забруднення області Ω викидами НХР є їхня концентрація в точках даної області:

$$c = C(x, y, t, Z, Q),$$

де t – час, який пройшов з початку виникнення НС з викидом НХР на об'єкті S_i .

Розрахунок концентраційного поля НХР в області \mathfrak{R} може виконуватися згідно рекомендацій методик [7, 8].

Зауваження 1. При одночасній присутності в атмосфері декількох однотипних НХР, сумарна їх концентрація C у кожній точці місцевості дорівнює суперпозиції концентрацій [9]:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_N,$$

де N – кількість об'єктів, які є джерелами викидів однотипних НХР.

Зауваження 2. Сумарна концентрація декількох різних НХР у кожній точці місцевості приводиться до значення концентрації C однієї з них [9] та розраховується за формулою:

$$C = C_1 + C_2 \frac{\text{ГДК}_1}{\text{ГДК}_2} + \dots + C_n \frac{\text{ГДК}_1}{\text{ГДК}_n},$$

де C_1 – концентрація НХР, по якій виконується приведення; ГДК_1 – його гранично допустима концентрація; C_2, \dots, C_n і $\text{ГДК}_2, \dots, \text{ГДК}_n$ – відповідно концентрації та ГДК інших НХР, що входять до групи сумарної.

Зауваження 3. При одночасній присутності в атмосфері декількох різних небезпечних хімічних речовин, які мають сумасією дії, їх безрозмірна сумарна концентрація не повинна перевищувати одиниці [9]:

$$C = \frac{C_1}{\text{ГДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ГДК}_2} + \dots + \frac{C_N}{\text{ГДК}_N} \leq 1,$$

де C_1, C_2, \dots, C_N – концентрація НХР в атмосфері (у одній точці місцевості), мг/м^3 ; $\text{ГДК}_1, \text{ГДК}_2, \dots, \text{ГДК}_N$ – відповідні гранично допустимі концентрації цих НХР в атмосферному повітрі, мг/м^3 .

Оптимізаційну задачу можна сформулювати таким чином:

знайти таке розміщення об'єктів S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) в області Ω , щоб величина максимальної сумарної концентрації НХР в області \mathcal{U} була мінімальною, тобто знайти

$$\min_{Z \in W} \max_{(x,y) \in \mathcal{R}} C(x, y, t, Z, Q), \quad (1)$$

де W – область допустимих розв'язків задачі, яка формується системою геометричних, технологічних обмежень.

Геометричні обмеження [10, 11] визначають умови взаємного розміщення об'єктів S_i і S_j ($i, j=1, 2, \dots, N, i \neq j$), умови взаємного розміщення об'єктів S_i ($i=1, 2, \dots, N$) і областей заборони K_j ($j=1, 2, \dots, J$), а також належності об'єктів S_i ($i=1, 2, \dots, N$) області розміщення Ω .

Формалізація геометричних обмежень виконується за допомогою апарату Φ -функцій [6].

Технологічні обмеження можуть містити, наприклад, обмеження на допустимі відстані між об'єктами, що розміщуються, між об'єктами та транспортною, енергетичною мережами тощо.

Як показано в дослідженнях [4–6], розміщення хімічно небезпечних об'єктів S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) може бути зведено до розміщення їх зон забруднення, які моделюються восьмикутниками, побудованими на розі вітрів місцевості, де знаходиться область Ω .

Така модель зони забруднення пов'язана з неможливістю визначення величини геокліматичних факторів Q (напрямку і швидкості вітру) в області Ω у зв'язку з невизначеністю часу виникнення НС з викидом НХР у атмосферу.

Границя Γ отриманого восьмикутника – це лінія, у кожній точці якої досягається максимальна концентрація НХР в даному напрямку λ :

$$C(x,y)|_{(x,y) \in \Gamma} = \max C(x,y)|_{\lambda} = C_M|_{\lambda}.$$

Графічна інтерпретація побудови можливої зони забруднення наведена на рис. 1 [6].

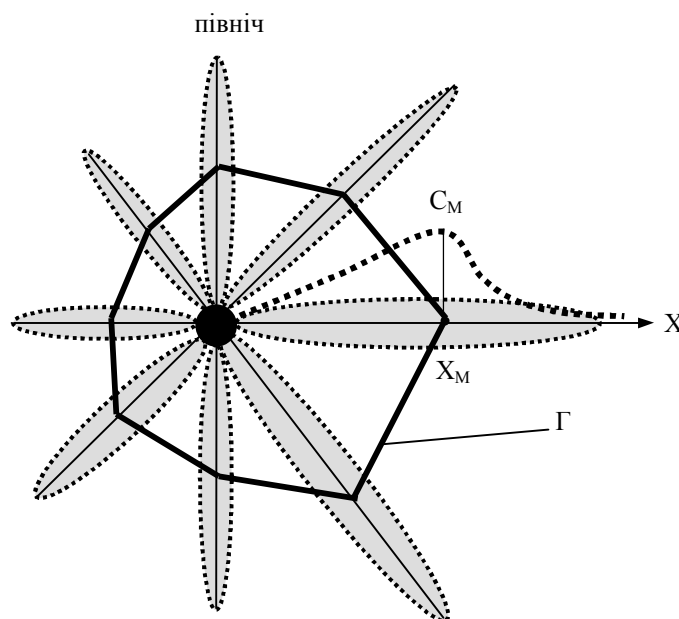


Рис. 1. Модель зони забруднення у вигляді восьмикутника

Така побудова області забруднення гарантує, що за її межами концентрація НХР буде менше, ніж на границі.

Розподіл концентрації НХР в області розміщення при побудові зони забруднення за вказаним методом відповідає часу t з початку виникнення НС з викидом НХР на об'єкті S_i , при якому максимальна концентрація НХР дорівнює її гранично допустимій: $C_M = ГДК$.

Аналіз оптимізаційної задачі (1) показав, що застосування для її розв'язання точних методів нелінійного математичного програмування [12, 13] є неможливим.

Тому для визначення оптимального розміщення об'єктів S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) пропонується чисельний метод, який дає змогу отримати наближений розв'язок задачі (1).

Запропонований метод розв'язку задачі (1) заснований на схемі методу мінімізації по групах змінних [12, 13], у якості яких виступають параметри розміщення об'єктів S_i .

Об'єкти розміщуються послідовно з урахуванням системи обмежень таким чином, що новому вектору розміщення відповідає менше значення цільової функції задачі (1):

$$F(x, y, t, Z^{p+1}, Q) < F(x, y, t, Z^p, Q),$$

$$\text{де } F(Z) = \max_{(x,y) \in \mathbb{R}} C(x, y, t, Z, Q);$$

p – номер ітерації.

Загальна схема методу визначення вектору розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільової функції задачі (1), на p -й ітерації складається з таких кроків [6]:

Крок 1. Визначається об'єкт S_k , що змінює своє положення і має на p -й ітерації параметри розміщення $z_k^p = (x_k^p, y_k^p)$.

Крок 2. Виділяються обмеження, що формують в навколо полюса рухомого об'єкта S_k область W_k^p допустимих параметрів його розміщення на p -й ітерації.

Крок 3. Визначається напрямок і крок зміщення об'єкта S_k . Параметри розміщення об'єкта S_k отримують приріст Δ_k^p , що приводить до зменшення значення цільової функції задачі (1), визначеного на $(p-1)$ ітерації:

$$\Delta^p < \Delta^{p-1}.$$

Знаходяться нові параметри розміщення

$$z_k^{p+1} = (x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$$

об'єкта S_k :

$$x_k^{p+1} = x_k^p + \Delta_k^p; \quad y_k^{p+1} = y_k^p + \Delta_k^p.$$

Крок 4. Проводиться перевірка виконання системи обмежень для нового положення об'єкта S_k :

$$(x_k^{p+1}, y_k^{p+1}) \in W_k^p.$$

У разі її виконання здійснюється перехід до **Кроку 5**, в іншому випадку – до **Кроку 3**.

Крок 5. Номер K збільшується на одиницю. При $K \leq N$ здійснюється повернення до **Кроку 1**.

Крок 6. Якщо на p -й ітерації хоча б один з об'єктів змінив своє положення, тобто $Z^p \neq Z^{p-1}$, то номер P збільшується на 1 і здійснюється перехід до **Кроку 1**. В іншому випадку розв'язком задачі (1) вважають вектор Z^p параметром розміщення об'єкта S_i , ($i = 1, 2, \dots, N$), отриманий на $(p-1)$ ітерації.

Конкретні алгоритми, що реалізують наведену загальну схему, можуть відрізнятися правилом визначення рухомого об'єкта S_k (**Крок 1**) і вибором напрямку і величини зміщення Δ_k^p (**Крок 3**).

Вибір об'єкта, який першим розпочинає змінювати параметри розміщення (**Крок 1**), може здійснюватися різними шляхами, виходячи з умов конкретної задачі. Наприклад, це може бути об'єкт S_k , при НС на якому відбувається викид НХР з мінімальним значенням ГДК (тобто найбільш токсичної). У цьому випадку визнаються значення ГДК для усіх НХР, які обертаються на хімічно небезпечних об'єктах S_i ($i = 1, 2, \dots, N$), об'єкти S_i ранжуються за зростанням величини ГДК і отриманий ряд представляє собою послідовність зміни параметрів розміщення об'єктів S_i .

Вибір напрямку і величини зміщення Δ_k^p об'єктів (**Крок 3**) доцільно виконувати градієнтним методом [12, 13]. У цьому випадку напрям зміщення об'єкту S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) співпадає з антиградієнтом цільової функції задачі (1) по параметрах його розміщення. Координати нового положення полюса об'єкта S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) на $p+1$ ітерації визначаються за формулою:

$$z_i^{p+1} = z_i^p - \Delta_k^p = z_i^p - \alpha_i^p g_i^p,$$

або в проєкціях на координатні осі:

$$x_i^{p+1} = x_i^p - \alpha_i^p g_{ix}^p,$$

$$y_i^{p+1} = y_i^p - \alpha_i^p g_{iy}^p,$$

де $g_i^p = \text{grad}F(x, y, t, Z, Q)$ – градієнт цільової функції $F(x, y, t, Z, Q)$ по параметрах розміщення об'єкта S_i на p -й ітерації; g_{ix}^p і g_{iy}^p – проєкції вектора градієнта g_i^p на координатні осі; константа α_i^p – шаг зміщення об'єкту S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) в напрямку антиградієнту.

Часткові похідні від функції $F(x, y, Z, G, Q)$ по параметрах розміщення об'єктів визначаються чисельним методом, наведеним в [13]. Це обумовлено рядом причин, зокрема, необхідністю визначенням концентраційного поля НХР в області розміщення для обчислення функції мети оптимізаційної задачі.

Метод, що пропонується, дозволяє отримати раціональне розміщення хімічно небезпечних об'єктів. Це пояснюється тим, що об'єкти розміщуються послідовно.

Однак вибір такого методу розв'язку, який є модифікацією методу Гаусса-Зейделя [13], обумовлений особливостями даної задачі і дозволяє отримати досить хороше наближення до локального мінімуму задачі.

Мінімізація в просторі розмірності $2N$ замінюється N -кратною мінімізацією в двовимірних просторах параметрів розміщення об'єктів S_i ($i = 1, 2, \dots, N$).

Це дозволило скоротити кількість громіздких обчислень, пов'язаних з необхідністю перевірки виконання системи обмежень, що включає в себе чисельне визначення розподілу концентрації небезпечних хімічних речовин, а також за рахунок зниження розмірності і зменшення числа обмежувальних умов на кожному кроці оптимізації.

Висновки

Запропоновано математичну модель та метод розв'язання оптимізаційної задачі розміщення хімічно небезпечних об'єктів у заданій області з урахуванням кліматичних умов.

Список літератури

1. Попов В.М. Показатели эффективности региональной системы техногенной безопасности / В.М. Попов, И.А. Чуб, М.В. Новожилова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2(20). – С. 32-41.

2. Попов В.М. Модель адаптивной системы техногенной безопасности региона В. М. Попов, И.А. Чуб,

М.В.Новожилова // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – Вип. 2(26). – С. 120-123.

3. Попов В.М. Інформаційна технологія підвищення техногенної безпеки регіону / В.М. Попов, І.А. Чуб, М.В. Новожилова // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 15. – С. 134-138.

4. Чуб И.А. Размещение объектов техногенной опасности с минимизацией уровня воздействия возможной чрезвычайной ситуации / И.А. Чуб, Е.В. Мориц, А.О. Труш, С.В. Ковальский // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 16. – С. 248–251.

5. Чуб И.А. Моделирование размещения пожароопасных объектов с учетом опасных факторов возможного пожара / И.А. Чуб, Е.В. Мориц // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 15. – С. 224–227.

6. Чуб И.А. Моделирование размещения пожароопасных объектов: минимизация загрязнения атмосферы / И.А. Чуб, М.В. Новожилова, В.А. Аноронов. – Харьков: ІД ІНЖЕК, 2012. – 133 с.

7. Методика оценки последствий химических аварий. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2005. – 57 с.

8. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 46 с.

9. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1985. – 271 с.

10. Чуб И.А. Построение системы геометрических ограничений в задачах оптимизации размещения пожаровзрывоопасных объектов / И.А. Чуб // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2007. – Вип 16. – С. 125–132.

11. Новожилова М.В., Чуб І.А. Умовля розміщення екологічно небезпечного об'єкта з урахуванням змінних геометричних характеристик області можливого забруднення / М.В.Новожилова, І.А. Чуб // Науковий вісник будівництва. – 2009 – № 54. – С. 240-248.

12. Банди Б. Методы оптимизации / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

13. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 536 с.

Надійшла до редколегії 27.10.2017

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. Н.Д. Сизова, Харківський національний університет будівництва і архітектури, Харків.

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ВЛИЯНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ С ВОЗМОЖНЫМИ ВЫБРОСАМИ ОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

И.А. Чуб, М.В. Новожилова, Н.Ю. Карпенко

Представлены математическая модель и метод решения задачи минимизации влияния чрезвычайной ситуации с возможными выбросами опасных химических веществ в атмосферу путем рационального размещения химически опасных объектов в заданной области с учетом ее климатических условий.

Ключевые слова: метод минимизации, химически опасные вещества, оптимальное размещение объектов.

METHOD TO MINIMIZE THE IMPACT OF AN EMERGENCY SITUATION WITH POSSIBLE RELEASES OF HAZARDOUS CHEMICALS INTO THE ATMOSPHERE

I.A. Chub, M.V. Novozhilova, N.Yu. Karpenko

A mathematical model and a method for solving the problem of minimizing the impact of an emergency situation with possible releases of hazardous chemicals into the atmosphere through the rational placement of chemically hazardous objects in a given area, taking into account its climatic conditions, are presented.

Keywords: minimization method, chemically dangerous substances, optimal planning of objects.

Оптимізація транспортних систем

УДК 629.429.3:621.313

О.М. Петренко¹, Б.Г. Любарський²

¹ Харківський університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОВОЗА

В статті розроблено методику оптимізації режимів роботи мотор-вентилятора тягового асинхронного двигуна електровозу, що рухається ділянкою колії, яка основана на вирішенні задачі умовної мінімізації за критерієм економічної ефективності системи охолодження методом Вейля за узагальненим золотим перетином.

Ключові слова: електровоз, критерій оптимізації, параметри оптимізації, тяговий асинхронний двигун, кількість пар полюсів двигуна мотор-вентилятора.

Вступ

Для охолодження асинхронних тягових двигунів (АТД) зі ступенем захисту IP23 та IP23, які застосовуються для сучасних локомотивів використовуються примусова вентиляція тягових двигунів до якої входить мотор-вентилятор, що встановлений у кузові локомотива та забезпечує постійний потік повітря охолоджує тяговий двигуна. Привод мотор вентилятора здійснюється за рахунок асинхронного двигуна потужність якого складає близько 10..30 кВт.

Аналіз останніх досліджень. Режим роботи тягового приводу тепловозу залежать від комплексу таких факторів: ваги потягу; профілю шляху, графіку руху, кліматичних явищ (швидкості вітру, опадів та інші), режимів роботи системи керування тяговим приводом, системи електропостачання та інші [1 – 6]. процеси нагріву та охолодження у тягових двигунах характеризуються великими значеннями постійної часу, що може становити 10..30 хв. [1 – 6], а нагрів двигуна до постійної температури може тривати 35...100 хв. [1 – 6]. Однак тяговий привод може змінювати свої режими роботи кілька разів за одну хвилину, що обумовлює більшу динамічність електромеханічні процеси у рухомому складі. Таким чином для визначення теплового стану елементів конструкції тягових двигунів необхідно врахувати весь цикл роботи [1, 2] тягового приводу.

Оптимізація параметрів режимів роботи мотор-вентилятора АТД є актуальною науково-технічною задачею для залізничного транспорту, яку можливо вирішити на основі застосування методів оптимізації, як режимів роботи тягового приводу з АТД, так і локомотиву на ділянці колії за оптимальною траєкторією руху, а також з викорис-

танням системи охолодження АТД з оптимальними режимами роботи та параметрами.

В роботах [1, 7 – 12] розглянуто наступні шляхи вирішення задачі. Перший шлях є підвищення системи охолодження та створення оптимальних за геометрією вентиляторів тягових двигунів. Другий – застосування режимів роботи АТД на електрорухомому складі (ЕРС), що рухається з різною швидкістю та при різних навантаженнях, значно знижують загальний ККД електрорухомого складу [1, 7 – 12]. Визначення оптимальних за енергоспоживанням режимів руху дозволяє підвищити ефективність системи охолодження тягових двигунів [7, 8].

Мета статті: розробка методики оптимізації режимів роботи мотор-вентилятора асинхронного тягового двигуна локомотиву.

Результати досліджень

Для вирішення поставленої мети запропоновано застосування методів умовної оптимізації режимів роботи системи охолодження та вентиляції АТД локомотиву.

В якості критерію у дослідженні було обрано критерій економічної ефективності $k_{e, e}$, в зв'язку з тим що основні витратами при роботі ЕРС є витрати на його експлуатацію, що пов'язано з досить тривалим строком життєвого циклу транспортних засобів (від 10 до 50 років.), який визначається за виразом [13,14]:

$$k_{e, e} = Q_{\text{охол}} / (n_{\text{тд}} Q_a), \quad (1)$$

де $n_{\text{тд}}$ – кількість тягових двигунів, що охолоджуються за одним мотор вентилятором, $Q_{\text{охол}}$ – витрати енергії на охолодження; Q_a – втрати енергії в активних частинах АТД.

В більшості конструкцій сучасного рухомого складу для приводу мотор-вентиляторів охолодження тягових двигунів використовуються асинх-

ронні двигуни, що живляться від некерованих джерел напруги та не мають регулювання частоти обертання. Регулювання режимів роботи здійснюється завдяки дискретному включення мотор-вентилятора з урахуванням температури в елементах конструкції тягових двигунів. Потужність асинхронних двигунів приводу мотор-вентилятора обумовлюється частотою обертання колеса вентилятора та конструкцією системи вентиляції. [15] В зв'язку з тим, що остання залежить від конструктивних та компонованих рішень при створення усього локомотиву параметрами для вирішення задачі оптимізації режимів роботи систем охолодження АТД обрані наступні величини [15]:

– найбільше перегрівання над температурою охолоджувального середовища в елементах конструкції АТД, при якій включається мотор-вентилятори охолодження тягових двигунів ($t_{отк}$);

– число пар полюсів асинхронного двигуна приводу мотор-вентилятора (p), що є безрозмірною величиною та обумовлює частоту обертання колеса мотор-вентилятора.

Обмеження, що накладаються при вирішенні задачі оптимізації режимів роботи системи охолодження та вентиляції можливо розділити на такі групи [15]:

– обмеження у вигляді нерівностей, що накладаються на параметри оптимізації [15]:

$$0 < t_{отк} < t_{доп}; \quad (2)$$

$$1 < p < 14, \quad (3)$$

де $t_{доп}$ – максимально допустиме перегрівання над температурою охолоджувального середовища для елементів конструкції тягового двигуна, що обумовлено вимогами до класу ізоляції та максимальними температурами до них;

– обмеження, що накладаються на максимальний перегрів над температурою охолоджувального середовища елементів конструкції тягових двигунів, що виникає при русі локомотиву з составом на ділянці колії с заданим профілем та графіком руху [15]:

$$u_{max} < u_{доп}, \quad (4)$$

де u_{max} , $u_{доп}$ – вектори стовбці перегрівань елементів АТД та допустимих значень цих перегрівань.

Рішення задачі оптимізації проводиться на прикладі перспективного вантажного електровозу розробленого на базі вантажного тепловозу 2ТЕ25А параметри тягового приводу якого наведені в табл. 1 при русі з составом з 60 чотирьохвісними вагонами загальною масою 3600 тон в режимі підтримання середньої швидкості в 20км/год. Основні технічні характеристики тягових приводів приведені та результати визначення оптимальних траєкторій руху трамваю приведено у роботі [15]. Далі визначити втрати у елементах АТД локомотиву на підставі методики, що наведена у роботах [15] результати яких наведено на рис. 1.

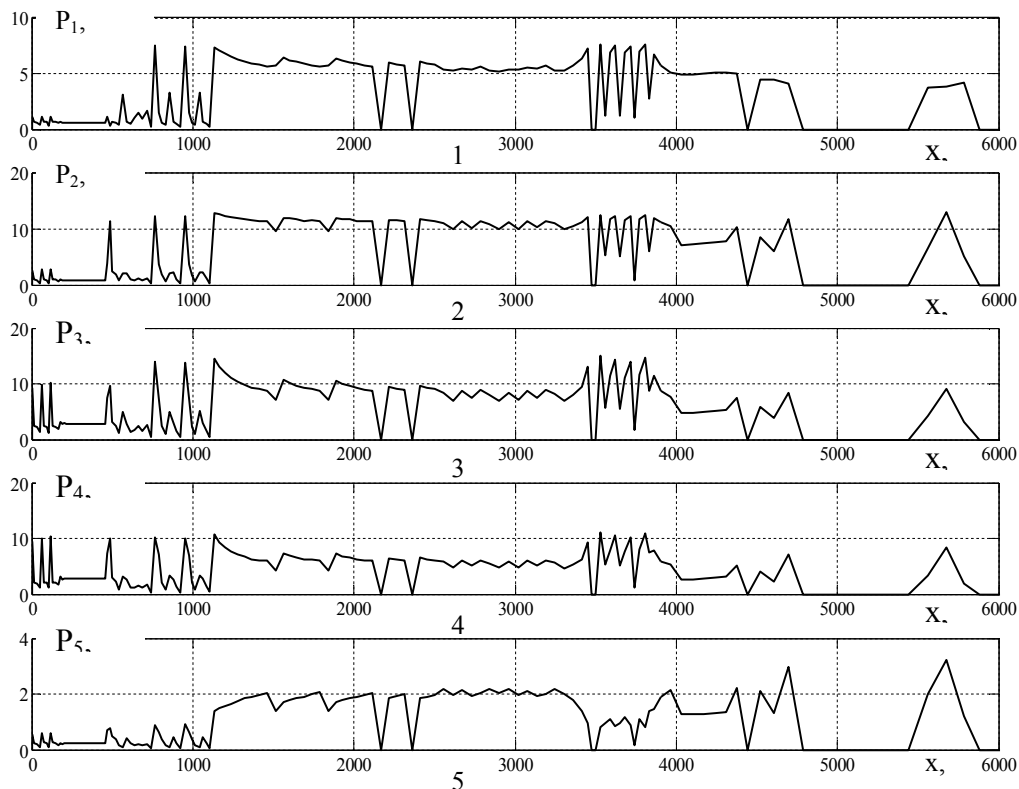


Рис. 1. Втрати у тяговим двигуном: 1 – втрати у сталі статора P_1 ; Вт; 2 – втрати у роторі P_2 ; Вт; 3 – пазової частині обмотки статора P_3 ; Вт; 4 – лобовій частині обмотки статора P_4 ; Вт; 5 – механічні втрати P_5 , Вт

За результатами цих залежностей визначаємо витрати енергії в активних частинах АТД можливо визначити за виразом

$$Q_a = \sum_{n=1}^5 \int_T P_n, \quad (5)$$

де P_1 – втрати у сталі статора; P_2 – втрати у роторі; P_3 – втрати у пазу обмотки статора, P_4 – лобовій частині обмотки статора, P_5 – механічні втрати.

Ці результати є вхідними даними для вирішення задачі аналізу яка базується на методиці моделювання теплових режимів яка наведена в роботах [10 – 12]. Відповідно до цієї методики пропонується застосування універсальної еквівалентної теплової схеми, що дозволяє виконувати теплові розрахунки нестационарних режимів роботи АТД за різних систем охолодження. В роботах [10 – 12, 16] розглянуто використання універсальної теплової схеми для теплових розрахунків асинхронних двигунів регульованих електроприводів для двигунів зі ступенем захисту IP23, IP22 до яких належить АД 917. Для розрахунку еквівалентної теплової схеми пропонується використати метод вузлових потенціалів для електричних кіл.

На його підставі для запропонованої універсальної еквівалентної теплової схеми може бути складена система диференціальних рівнянь теплового балансу. Величини потужностей тепловиділення розраховуються за втратами в елементах АТД, які змінюються за часом, в залежності від режиму роботи тягового приводу, що наведені на рис. 1 та в роботі [15] Також змінюються і провідності схеми заміщення в залежності від потоку повітря, що створює мотор-вентилятор та залежать від параметрів які прийняті для вирішення задачі аналізу.

Для визначення обмеження проводиться аналіз змін перегрівань елементів АТД за весь час моделювання теплових режимів за виразом

$$u_{\max} = \text{MAX}(u). \quad (6)$$

Втрати потужності на охолодження знаходяться за виразом [17,18]

$$Q_{\text{вен}} = \int_T \frac{\Delta p Q_v}{\eta_v} dt, \quad (7)$$

де Δp – тиск повітря в вентиляторі, Q_v – потік повітря у вентиляторі, η_v – ККД вентилятора, які визначаються за результатами вентиляційного розрахунку за методикою наведеною в [17, 18] та залежать від геометрії вентилятора та частоти його обертання, T – інтервал часу руху ЕРС.

Результатом вирішення задачі аналізу є знаходження критерію оптимізації за виразом (1).

За результатами вирішення тестових задач оптимізації режимів роботи мотор-вентилятора АТД найкращий результат показав метод Вейля за уза-

гальним золотим перетином.

Хід вирішення задачі наведено на рис. 2 (ромбом позначена оптимальна точка, круг – стартова.).

Отримані такі оптимальні значення $t_{\text{отк}} = 64,1$ °С, а кількість пар полюсів – 5. Розрахункова частота обертання мотор-вентилятора становить 570 об/хв. Потрібна потужність мотор-вентилятора складає 370 Вт, що значно менше за потужність базового мотор-вентилятор, що складає 22 кВт та має частоту обертання 2950 об/хв. Критерій оптимальності у розглянутій задачі становив значення 0,03.

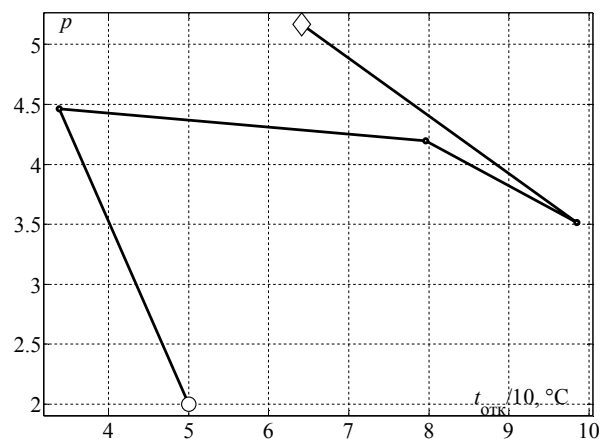


Рис. 3. Хід вирішення задачі оптимізації

Висновки

Розроблено методику оптимізації режимів роботи мотор-вентилятора тягового асинхронного двигуна локомотива, що рухається на ділянці колії с заданим профілем та графіком, особливості якої є такі:

- методика основана на вирішенні задачі умовної мінімізації за критерієм економічної ефективності системи охолодження методом Вейля за узагальненим золотим перетином;

- в якості параметрів оптимізації обрані наступні величини: температура обмоток тягового двигуна при якій проходить включення мотор-вентилятора та кількість пар полюсів двигуна мотор-вентилятора, також встановлені обмеження у вигляді нерівностей;

- задача аналізу системи вентиляції та охолодження тягових двигунів основана на моделюванні теплових режимів АТД за узагальненою еквівалентною тепловою схемою.

Для тестової задачі оптимізації керування системою вентиляції та охолодження, на прикладі перспективного вантажного електровозу, розробленого на базі вантажного тепловозу 2ТЕ25А, при русі з составом із 60 чотирьохвісних вагонів загальною масою 3600 тон в режимі підтримання середньої швидкості в 20 км/год, отримані такі оптимальні значення для мотор-вентилятору:

- температура включення – 64,1 °С;
- кількість пар полюсів двигуна – 5;

розрахункова частота обертання – 570 об/хв.;
 потрібна потужність складає 370 Вт, що значно менше за потужність базового мотор-вентилятора, що складає 22 кВт та має частоту обертання 2950 об/хв.

Критерій оптимальності у розглянутій задачі становив значення 0,03.

Список літератури

1. Любарський Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація ... доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. – «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2014. 368 с.
2. Гетьман Г.К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта [Текст]: монография / Г.К. Гетьман. – Д.: Изд. Днепр. нац. ун-та ж/д трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
3. Мокін О.Б. Моделювання та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом: монографія / О.Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 192 с.
4. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с.
5. Петренко О.М. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 6. – С. 8-13.
6. Todorov, Emanuel. "Optimal control theory." Bayesian brain: probabilistic approaches to neural coding (2006): 269-298.
7. Kappen, Hilbert J. "Optimal control theory and the linear bellman equation." Inference and Learning in Dynamic Models (2011): 363-387.
8. Петренко О.М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глебова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ", 2016. – № 6 (1178). – С. 89-95.
9. Петренко О.М. Методика оптимізації режимів роботи асинхронного тягового приводу рухомого складу/ О.М. Петренко, І.В. Доманський, Б.Г. Любарський // Механіка та машинобудування. – 2016. – №1. – С. 59-67
10. Петренко О. М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глебова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – № 6 (1178). – С. 89-95.
11. Петренко О.М. Математична модель оптимального керування рухом електрорухомого складу на підставі вирішення рівнянь Гамільтона-Якобі-Беллмана/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. – № 2. – С. 19-24
12. Петренко О.М. Методика оптимізації режимів роботи асинхронного тягового приводу рухомого складу/ О.М. Петренко, І.В. Доманський, Б.Г. Любарський // Механіка та машинобудування. – 2016. – №1. – С. 59-67
13. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
14. Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
15. Петренко О.М. Оптимізація керування мотор-вентилятором охолодження тягових двигунів вантажного локомотива з асинхронним тяговим приводом при русі на ділянці з заданим профілем та графіком руху / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. – № 2. – С. 9-15.
16. Петрушин В.С. Расчет температур конструктивных элементов асинхронных двигателей в динамических режимах/ В.С. Петрушин, С.В. Рябинин, А.М. Якимец // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», – 2000. – № 403. – С. 145 – 149.
17. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах./ И.Ф. Филиппов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 256 с.
18. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Т. Доманський, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОХЛАЖДЕНИЕ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА

А.Н. Петренко, Б.Г. Любарський

В статье разработана методика оптимизации режимов работы мотор-вентилятора тягового асинхронного двигателя электровоза, который движется по участку пути, основанная на решении задачи условной минимизации по критерию экономической эффективности системы охлаждения методом Вейля по обобщенным золотым сечением.

Ключевые слова: электровоз, критерий оптимизации, параметры оптимизации, тяговый асинхронный двигатель, число пар полюсов двигателя мотор-вентилятора.

OPTIMIZATION OF OPERATING MODES COOLING OF TRACTION ENGINE ELECTRICS

O.M. Petrenko, B.G. Liubarskyi

The article describes a technique for optimizing the operating modes of the motor-fan of a traction asynchronous electric locomotive engine that moves along a section of the track based on solving the problem of conditional minimization by the criterion of the economic efficiency of the cooling system by the Weyl method over the generalized golden section.

Keywords: electric locomotive, optimization criterion, optimization parameters, traction asynchronous motor, number of pole pairs of the motor-fan motor.

Зв'язок

УДК 519.218.82

Б.Р. Боряк, А.М. Сільвестров

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНОГО ДВОКОНТУРНОГО ФІЛЬТРА-ЕКСТРАПОЛЯТОРА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФОРМИ СИГНАЛУ

У даному дослідженні ми провели аналіз роботи адаптивного двоконтурного фільтра-екстраполятора, що працює по принципу подвійного експоненціального згладжування Брауна. Суть дослідження полягала у визначенні систем, де може бути ефективно застосований даний алгоритм обробки інформації, в залежності від форми сигналів, якими керуються системи. Протягом дослідження розглядалися сигнали представлені функціями псевдовипадкових чисел, лінійною функцією, квадратичною функцією, синусоїдальною функцією. Було визначено основні переваги і недоліки в алгоритмі обробки інформації.

Ключові слова: подвійне експоненціальне згладжування, шум, прогноз, сигнал, коефіцієнт згладжування.

Постановка проблеми

Алгоритм фільтрації базується на ноніусній (уточнюючій) структурі підключення елементарних фільтруючих одиниць, що працюють на основі подвійного експоненціального згладжування Брауна. Адаптація алгоритму побудована на основі простої логіки порівняння похибок прогнозу двох контурів фільтрації із різними коефіцієнтами згладжування. Детальніше будова алгоритму і принцип адаптації були описані у попередніх працях [1-3].

Якість прогнозу і згладжування сигналу залежить від кількох чинників. Першим із них є природа сигналу, що відслідковується. Якщо ми порівняємо сигнал, що може бути описаний функцією першого або другого степеня у певній часовій області і сигнал, який може бути описаний функцією випадкових чисел, розподілених по нормальному закону, то якість фільтрації і прогнозу даного алгоритму значно відрізнятимуться. Це пояснюється тим, що даний фільтр є рекурсивним і визначає згладжене і прогнозоване значення на основі попередніх значень. Окрім природи сигналу на якість обробки сигналу також впливають наступні фактори: амплітуда шумів, швидкість зміни амплітуди шумів протягом процесу фільтрації, відношення між частотою зміни амплітуди завад та проміжком часу, за який відбувається процес оцінювання, наявність випадкових шумових стрибків, різниця коефіцієнтів згладжування між двома контурами фільтрації, а також частота вимірів сигналу.

Для визначення спектру використання даного фільтруючого алгоритму проведено ряд експериментів, протягом яких, змінюючи величини вищезазначених факторів, від яких залежить якість фільтрації, відбувалось дослідження даного алгоритму. Для моделювання процесу фільтрації було використано мову програмування Matlab.

Параметри моделювання

Для скорочення описової частини кожного із випадків моделювання процесу фільтрації було введено ряд величин, що визначають основні параметри фільтра та умови, за яких формується вхідний сигнал, шумовий вплив, кількість вимірювань сигналу та інші параметри. n – кількість вимірів (кроків) сигналу, що визначають тривалість процесу моделювання; t – кількість вимірів (кроків) сигналу, що використовуються для оцінювання якості роботи двох контурів фільтрації; m – кількість кроків, на яку необхідно отримати прогнозоване значення сигналу; σ – параметр функції генерації псевдовипадкових чисел розподілених по нормальному закону, що визначає стандартне відхилення, у даному випадку – амплітуду шуму; α – коефіцієнт згладжування, визначає ступінь фільтрації, може змінюватись в межах від 0 до 1, є основним параметром, що змінюється під час адаптації; $\Delta\alpha$ – крок зміни коефіцієнта згладжування протягом процесу адаптації.

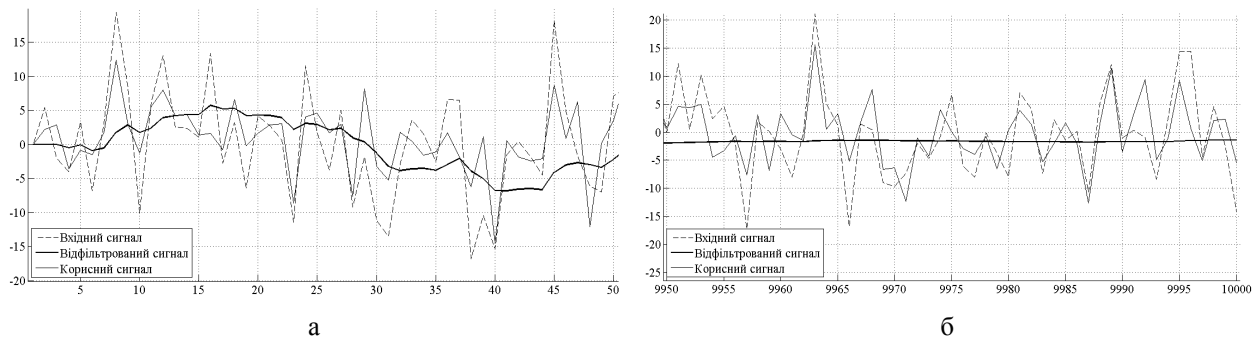
Аналіз процесу фільтрації сигналів

1. Вхідний сигнал представлений функцією псевдовипадкових чисел (рис. 1) із накладеним на нього шумом, що описується аналогічною до вхідного сигналу функцією.

Параметр стандартного відхилення для обох функцій:

$$\sigma = 5; n = 10000; m = 3; t = 200; \text{початкове значення } \alpha = 0.1; \Delta\alpha = 0.1 \cdot \alpha.$$

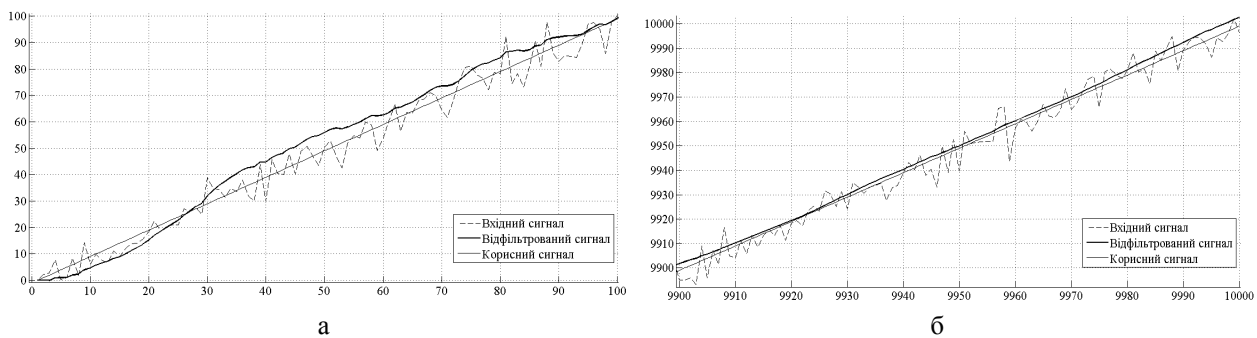
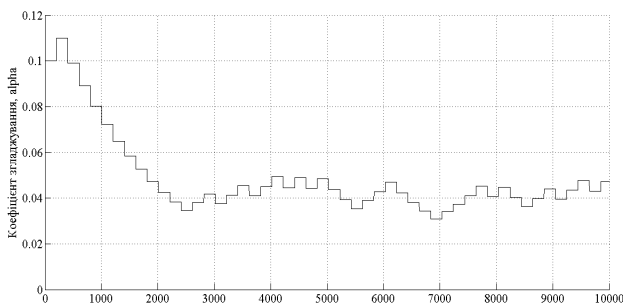
У результаті спостерегаємо (рис. 1), що у випадку із корисним сигналом, що описується функцією псевдовипадкових чисел, фільтруючий алгоритм не має змоги побудувати передбачення на основі попередньо отриманих даних, так як вони не мають ніякої закономірності.

Рис. 1. Вхідний, корисний і відфільтрований сигнал: а – $n \in [0:50]$; б – $n \in [9950:10000]$

2. Вхідний сигнал представлений лінійною функцією $y(x)=kx$ (рис. 2), де $k = 1$, із накладеним на нього шумовим впливом. Параметри моделювання: $\sigma = 5$; $n = 10000$; $m = 3$; $t = 200$; початкове значення $\alpha = 0.1$; $\Delta\alpha = 0.1 \cdot \alpha$.

У даному випадку спостерігається адаптація коефіцієнта фільтрації (рис. 3) і подальше його ко-

ливання в межах від 0.0309 до 0.0495. Відфільтрований сигнал є прогнозованим через це графік даного сигналу зсунутий вліво. Величина зсуву може змінюватись під впливом зміни коефіцієнта згладжування і подальшого перерозподілу впливу значення поточного вхідного сигналу і згладженого сигналу у попередній момент часу на прогноз.

Рис. 2. Вхідний, корисний і відфільтрований сигнал: а – $n \in [0:100]$; б – $n \in [9900:10000]$ Рис. 3. Зміна коефіцієнта згладжування α протягом процесу адаптації

Розділимо умовно процес адаптації у даному випадку на два етапи. Перший етап: налаштування фільтруючого пристрою під конкретний рівень шуму, у даному випадку, незмінний. Візьмемо точку процесу фільтрації, коли коефіцієнт фільтрації набув значення, що входить у межі від 0.0309 до 0.0495, як початок другого етапу, у даній модуляції це $k = 1812$. Другий етап процесу адаптації характеризується коливанням коефіцієнта фільтрації у межах зазначених вище. Це характеризується тим, що якщо після процесу оцінювання, наприклад, похибка прогнозу у контурі із більшим значенням α буде меншою, аніж у контурі із меншим значенням α то,

за логікою даного алгоритму фільтрації, α буде збільшена на 10% (величина збільшення та зменшення коефіцієнта згладжування також задається перед процесом моделювання), і навпаки. Саме тому коефіцієнт згладжування змінює своє значення кожні t вимірів.

Порівнюючи ці два етапи, можна зробити висновок, що якість фільтрації значно зростає на другому етапі, хоч і прогнозований сигнал не завжди зміщений на необхідну кількість кроків, але він повторює форму корисного сигналу і дає уявлення про майбутнє значення у випадку сигналу лінійної форми.

3. Порівняємо процеси адаптації алгоритму фільтрації за умови, що вхідні сигнали представлені лінійними функціями $y(x)=kx$, із $k = 0.5$ та $k = 2$, із накладеним на нього шумовим впливом (рис. 4). Параметри моделювання: $\sigma = 5$; $n = 10000$; $m = 3$; $t = 200$; початкове значення $\alpha = 0.1$; $\Delta\alpha = 0.1 \cdot \alpha$.

За отриманими графіками можна визначити, що перша стадія адаптації триває приблизно протягом перших 2000 вимірів сигналу, за умов, які вказані вище, а саме: даного рівня шуму, початкового значення коефіцієнта згладжування, а також обраної кількості вимірів, що визначають період, за який відбувається оцінка якості системи фільтрації.

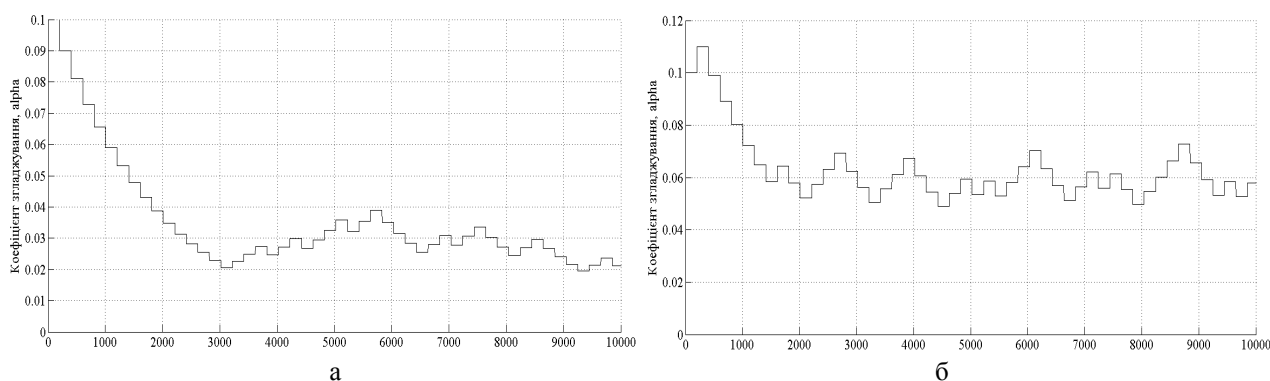


Рис. 4. Зміна коефіцієнта згладжування α протягом процесу адаптації а – при $k = 0.5$; б – при $k = 2$

На основі отриманих вище даних можна зробити висновок, що за умови, коли система фільтрації намагається відстежити сигнал, що має лінійну складову і надходить на вхід системи із накладеним на нього шумом, алгоритму необхідний певний час, який не значно залежить від кривизни лінії, для адаптації коефіцієнта згладжування під певний рівень завад. Також варто відзначити, що кривизна сигналу лінійної форми впливає на коефіцієнт згладжування. Так, зі збільшенням кривизни сигналу вплив завад на корисний сигнал зменшується і коефіцієнт згладжування зростає і навпаки.

4. Вхідний сигнал представлений квадратичною функцією $y(x)=kx^2$, де $k = 0.25$ (рис. 5), із накладеним на нього шумовим впливом. Параметри моделювання: $\sigma = 10000$; $n = 50000$; $m = 3$; $t = 200$; початкове значення $\alpha = 0.1$; $\Delta\alpha = 0.1 \cdot \alpha$. Параметр стандартного відхилення у функції генерації псев-

довипадкових чисел розподілених по нормальному закону, що відіграє роль завад, σ був збільшений до значення 10000 у зв'язку із тим, що малі значення цього параметра мають дуже незначний спотворюючий вплив за умови, коли корисний сигнал описується квадратичною функцією. У даному випадку можемо спостерігати, що розподілення на дві стадії адаптації, як у випадку із сигналом лінійної форми є не зовсім доцільним за тому, що за рахунок квадратичного росту вплив шумів зменшується. Таким чином, протягом, приблизно, перших 2000 вимірів алгоритм адаптується відповідно до даного рівня шуму після чого, подібно до досліду із вхідним сигналом лінійної форми, відбуваються коливальні зміни коефіцієнта фільтрації, але значення α , у даному випадку, не залишається у визначених межах, а зростає. Ефект зменшення впливу шумів з часом можна наочно спостерігати порівнюючи рис. 5, а та 5, б.

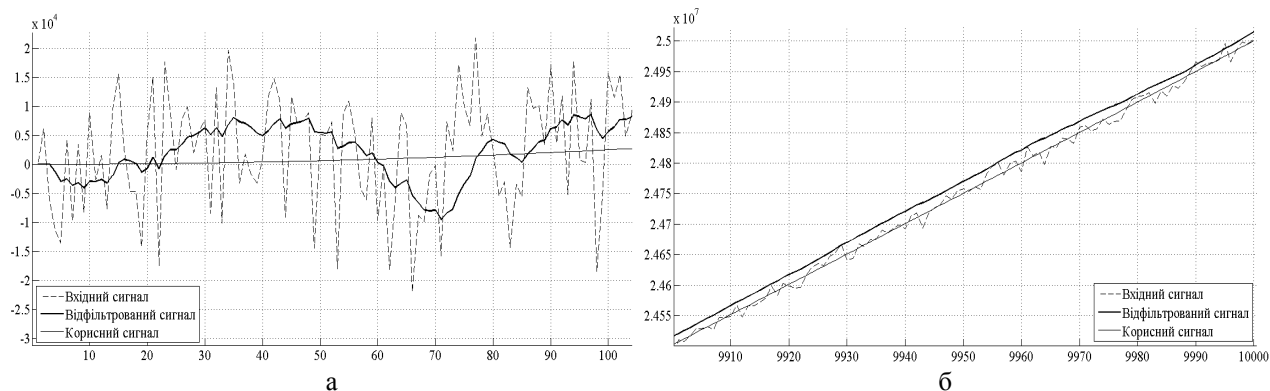


Рис. 5. Вхідний, корисний і відфільтрований сигнал: а – $n \in [0:100]$; б – $n \in [9900:10000]$

Для перевірки вище приведеного твердження про моделюємо даний процес із вищезгаданими умовами, змінивши кількість вимірів із 10000 на 50000. Даний процес зображений на рис. 6.

Варто зазначити також те, що відсутність зміни параметра $\Delta\alpha$ забезпечує досить широкий спектр коливання коефіцієнта згладжування, що змінюється кожні 200 кроків (для даного дослідження). Це може призвести до втрат інформації, і даний ефект може бути компенсований за допомогою коригування алгоритму адаптації.

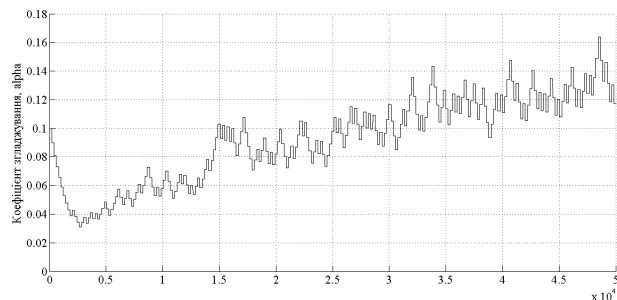


Рис. 6. Зміна коефіцієнта згладжування α протягом процесу адаптації

5. Вхідний сигнал описується синусоїдальною функцією $y(x)=\sin(x/k)$ (рис. 7), із накладеним на нього шумовим впливом. Коефіцієнт k , у даному випадку, введений для того, щоб зменшити частоту зміни сигналу, $k=10$. Параметри моделювання: $\sigma=0.25$; $n=10000$; $m=3$; $t=100$; початкове значення $\alpha=0.1$; $\Delta\alpha=0.1\cdot\alpha$. Дане зображення дає змогу спостерігати швидкодію роботи алгоритму та якість фільтрації.

Варто зазначити, що при синусоїдальній природі сигналу на якість і швидкодію мають великий вплив також такі чинники як кількість кроків, на яку проводиться прогнозування, а також відношення між частотою синусоїдального сигналу та кількість вимірів (кроків) сигналу, що використовуються для оцінювання якості роботи двох контурів фільтрації.

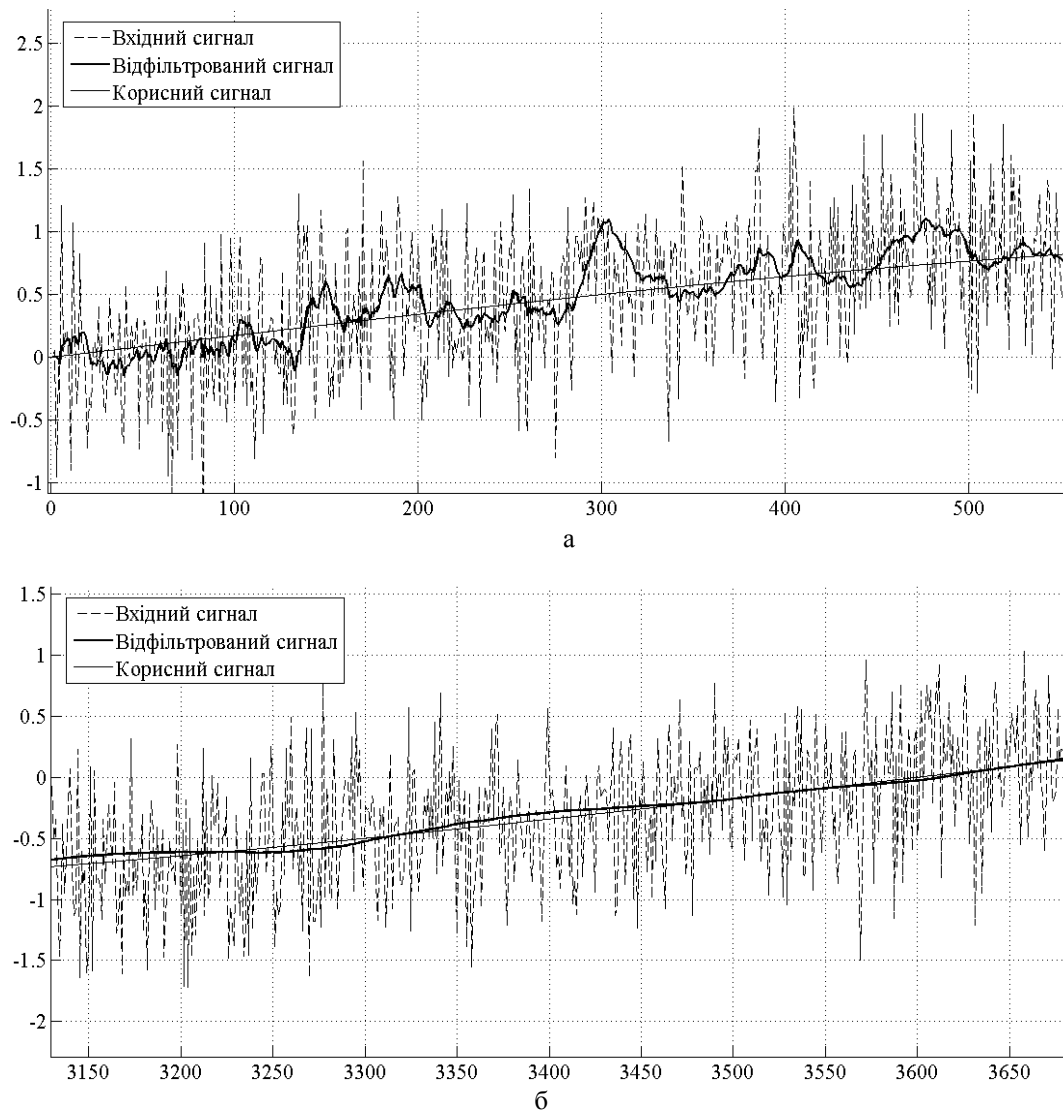


Рис. 7. Вхідний, корисний і відфільтрований сигнал: а – $n \in [0:550]$; б – $n \in [3250:3650]$

Аналізуючи роботу даного алгоритму при відстеженні сигналу синусоїдальної форми можна визначити, що одним із недоліків роботи є часткова втрата корисної інформації у місцях зміни траєкторії сигналу. Повна компенсація втрати даної інформації не є можливою в даному алгоритмі, але за рахунок зміни параметрів фільтруючої системи є можливість мінімізація втрати інформації.

Розглядаючи графік зміни коефіцієнта згладжування (рис. 8) протягом процесу адаптації можна встановити його схожість із графіком адаптації при роботі алгоритму у випадку відстеження сигналу лінійної форми.

Висновки

У результаті проведеного моделювання роботи адаптивного двоконтурного фільтра з використанням сигналів, що можуть бути описані за допомогою лінійних, квадратичних, синусоїдальних та псевдовипадкових функцій варто визначити основні кілька тверджень:

- застосування фільтра-екстраполятора у системах, сигнали яких можуть бути описані функцією псевдовипадкових значень, не є доцільним, адже відфільтроване і прогнозоване значення будується на основі попередніх значень сигналу;

Рис. 8. Зміна коефіцієнта згладжування α протягом процесу адаптації

– застосування даного алгоритму для сигналів, що мають лінійну і квадратичну складову є доцільним, але час налаштування фільтра під певний рівень завад займає час, що визначається частотою, з якою дані вимірів сигналу надходять до пристрою обробки інформації, кроком зміни коефіцієнта згладжування протягом процесу адаптації та рівнем завад;

– при використанні даного алгоритму для сигналів, що мають синусоїдальний характер ефективність роботи фільтра визначає співвідношення частоти вимірів сигналу до частоти зміни форми сигналу. Чим більше це співвідношення, тим якісніше буде відбуватись фільтрація і прогнозування;

– втрати інформації про форму і значення сигналу можуть мати місце у випадках різкої зміни траєкторії сигналу, величина втрати визначається співвідношенням, що наведено у попередньому твердженні.

Список літератури

1. Боряк Б. Р. Алгоритм згладжування та прогнозування сигналу на основі експоненціального фільтра моделі Брауна / Б. Р. Боряк, А. М. Сильвестров. // Збірник наукових праць. Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – № 4(44). – С. 150–152.
2. Боряк Б.Р. Дослідження алгоритму згладжування і налаштування адаптивного фільтра Брауна при зміні амплітуди шумів/ Б. Р. Боряк // 69 наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, квітень-травень, 2017р., - Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка. Том 1, С – 4-6.
3. Боряк Б. Р. Трикоординтний адаптивний експоненціальний фільтр-екстраполятор / Б. Р. Боряк, А. М. Сильвестров. // Збірник наукових праць. Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – №45. – С. 6–8.

Надійшла до редколегії 20.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, доц. О.В. Шульга, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ФИЛЬТРА-ЭКСТРАПОЛЯТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ СИГНАЛА

Б.Р. Боряк, А.М. Сильвестров

В данном исследовании мы провели анализ работы адаптивного двухконтурного фильтра-экстраполятора, работающего по принципу двойного экспоненциального сглаживания Брауна. Суть исследования заключалась в определении систем, где эффективно может быть применен данный алгоритм обработки информации, в зависимости от формы сигналов, которыми руководствуются системы. В течение исследования рассматривались сигналы, что описываются функциями псевдослучайных чисел, линейной функцией, квадратичной функцией, синусоидальной функцией. Были определены основные преимущества и недостатки в алгоритме обработки информации.

Ключевые слова: двойное экспоненциальное сглаживание, шум, прогноз, сигнал, коэффициент сглаживания.

ANALYSIS OF THE ADAPTIVE TWO-LOOP FILTER EXTRAPOLATOR EFFICIENCY USAGE ACCORDING TO THE SIGNAL SHAPE

B.R. Boriak, A.M. Silvestrov

In this research we analyzed the work of the adaptive two-loop filter extrapolator, which is functioning according to the Brown's double exponential smoothing. The aim of the research was to determine the systems in which the algorithm could be used according to the shape of the signals. During the research we used the pseudorandom number function signals, linear function signals, quadratic function signals and sine function signals. As a result, we determined the main advantages and disadvantages of the data processing algorithm.

Keywords: double exponential smoothing, noise, forecast, signal, smoothing factor.

УДК 621.391

А.В. Шишацький¹, Н.Г. Кучук², Є.М. Прокопенко³¹ Центральний НДІ озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків³ Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ РАЦІОНАЛЬНОЇ ТОПОЛОГІЇ БЕЗПРОВІДНИХ САМООРГАНІЗУЮЧИХ МЕРЕЖ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

В роботі запропонована методика синтезу раціональної топології безпроводних самоорганізуючих мереж спеціального призначення з використанням генетичного алгоритму. Зазначена методика дозволяє значно зменшити час прийняття рішення на визначення раціональної топології безпроводних самоорганізуючих мереж та дозволяє враховувати варіанти ведення радіоелектронного подавлення.

Ключові слова: генетичний алгоритм, штучний інтелект, оптимізація, маршрут, самоорганізуючі мережі, маршрутизація.

Вступ

Постановка проблеми. Останнє десятиліття мобільні радіомережі (МР) класу MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) стають все більш застосованими, як у повсякденному житті, так і у військовій галузі, а саме, в тактичній ланці управління військами [1-3].

Функціонування мобільних радіомереж (МР) відбувається в умовах динамічної зміни обстановки при веденні бойових дій, яка призводить до:

- виходу з ладу вузлів і каналів зв'язку;
- виникнення помилок в повідомленнях;
- зниження мобільності абонентів;

підвищення впливу випадкового характеру циркулюючих потоків даних.

Забезпечити стійке, безперервне і приховане управління військами в цих умовах неможливо без ефективної системи управління (СУ) МР.

Завдання управління топологією мережі полягає в забезпеченні передачі максимальної кількості повідомлень з необхідною якістю (достовірністю, оперативністю, надійністю та ін.). Топологія визначає потенційні можливості мережі з доставки даних між вузлами, що взаємодіють [2]. Мобільність (відмови, знищення пакетів) вузлів призводить до різних мережевих конфігурацій топології. В таких умовах зміна топології мережі може мати більший ефект, на відміну від використання маршрутизації.

Ефективне функціонування мобільних самоорганізуючих радіомереж (МСМ) залежить від структури її підсистем, а також від відповідності цих структур умовам навколишньої обстановки, насамперед, радіоелектронної обстановки.

Методики синтезу раціональної топології МР, розроблені до теперішнього часу, в основному використовують як вихідні дані обмежену кількість можливих варіантів радіоелектронної обстановки, які ви-

значаються, як правило, на основі суб'єктивних оцінок осіб, що приймають рішення. Дослідження всього простору рішень при визначенні раціональної топології, як правило, ускладнене із-за занадто великого обсягу необхідних розрахунків і неможливості аналітичного описання цільової функції.

В останні роки набувають розвитку методи штучного інтелекту, які дозволяють з достатньою швидкістю знаходити квазіоптимальні рішення у системах, цільові функції яких не мають аналітичного опису. Це робить актуальним проведення досліджень щодо застосування вказаних методів для синтезу раціональних значень топології мережі [1 – 3].

Метою даної статті є розробка методики синтезу раціональної топології безпроводних самоорганізуючих мереж спеціального призначення з використанням генетичного алгоритму.

Генетичний алгоритм, використання якого запропоноване в статті, дозволяє знайти раціональну топологію мобільних самоорганізуючих мереж з урахуванням варіанту ведення радіоелектронного подавлення противника.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо задачу управління топологією МР як задачу адаптивного управління [4, 5].

Нехай середовище описується такою парою:

$$X(t) = \{A(t), E(t)\},$$

де $A(t)$ – контрольований стан МР (потоки даних, пріоритетність абонентів, їх місце підключення до МР та ін.); $E(t)$ – її неконтрольований стан (перешкода, стан противника). Аналогічно $B(t) = \{Y(t), H(t)\}$, що описує стан МК: $Y(t)$ – її контрольований стан (середній час затримки пакетів в гілках мережі зв'язку, зв'язність МК, ступінь навантаження вузлів комутації та ін.); $H(t)$ – неконтрольований стан (ін-

тенсивність обслуговування пакетів в каналах та вузлах комутації та інш.). В якості основного критерію ефективності МР візьмемо максимум її пропускної здатності $\max S$. Він визначений на контролюємих станах системи та середовища

$$S(t) = S(\Lambda(t), Y(t)).$$

Стан МР $Y(t)$ в свою чергу залежить від згаданих $\Lambda(t)$, $E(t)$, $H(t)$, а також від управління $U(t)$:

$$Y(t) = F(\Lambda(t), E(t), H(t), U(t)),$$

де F – оператор системи, $U(t)$ – вибір вирішального методу (методики) управління радіоресурсом, топологією, маршрутизацією, навантаженням, безпекою, та якістю обслуговуванням МР $\bar{Y}(t) = \Phi(\bar{Y}(t))$, стан середовища $\Lambda(t)$ та цілей $Z^*(t)$

$$U(t) = U(\Lambda(t), \bar{Y}(t), Z^*(t)).$$

Для ефективного використання ресурсів мережі в вузлах необхідно передбачити можливість використання безлічі МД. Застосування конкретного методу доступу буде визначатися параметрами інформаційного навантаження, поточною метою управління мережею, ситуацією на мережі (її зоні) і прийнятими рішеннями на інших рівнях еталонної моделі [4, 5].

Вважаємо, що мета ведення радіоелектронного подавлення противника відома, відповідно, з використанням, наприклад, методик [6 – 11] визначений перелік вузлів МР, що підлягають радіоелектронному подавленню та визначені їх пріоритети, тобто деяка числова характеристика важливості того чи іншого вузла МР у досягненні мети радіоелектронного конфлікту противником.

Генетичний алгоритм [12] заснований на ідеї еволюції за допомогою природного відбору та являє собою штучну імітацію таких властивостей живої природи, як природний відбір, пристосованість до змінюваних умов середовища, спадкоємність нащадками властивостей батьків і т.ін.

Методика синтезу раціональної топології безпроводних самоорганізуючих мереж спеціального призначення з використанням генетичного алгоритму, алгоритм реалізації якої подано на рис. 1 складається з наступної послідовності дій.

Введення вихідних даних (дія 1 на рис. 1)

На даному етапі вводяться вихідні параметри мережі, кількість вузлів мережі, швидкість передачі інформації та початкова радіоелектронна обстановка.

Сутність генетичного пошуку полягає в циклічній заміні однієї популяції наступною, більш пристосованою. Можна вважати, що вся популяція складається в часі з дискретних поколінь $\Omega^{(0)}, \Omega^{(1)}, \Omega^{(2)}, \dots, \Omega^{(T)}$. Покоління $\Omega^{(t+1)}$ – це сукупність особин, батьки яких належать поколінню $\Omega^{(t)}$. Покоління $\Omega^{(0)}$ є початковою по-

пуляцією. Процес формування покоління $\Omega^{(0)}$ називається *ініціалізацією*. Кожне наступне покоління є результатом циклу роботи генетичного алгоритму.

Для кожної особини поточного покоління визначається значення цільової функції, яке характеризує пристосованість особини. У ході *відбору (селекції)* найменш пристосовані особини гинуть, а найбільш пристосовані дістають можливість відтворити нащадків у ході попарного *схрещування*. Це приводить до появи нових особин, які наслідують від батьків деякі властивості. Таким чином, з покоління в покоління, гарні властивості розповсюджуються по всій популяції. Для підвищення різноманітності пошуку і більш повного дослідження простору пошуку застосовується *мутація* – введення в популяцію нових особин. Зрештою, популяція збігатиметься до найбільш пристосованої особини (до оптимального рішення).

Для використання властивостей особин популяції у генетичному алгоритмі ці властивості подаються в закодованому вигляді – у вигляді *хромосоми*. Хромосома являє собою сукупність *генів*, кожний з яких зберігає певну властивість (ознаку, характеристику) особини. В залежності від того, які властивості необхідно закодувати і, відповідно, які значення можуть приймати гени, розрізняють бінарні, числові та векторні хромосоми, а в залежності від структури простору пошуку хромосоми можуть бути одно-, дво- або багатомірними. Таким чином, генетичні оператори (схрещування, мутації, відбору) здійснюють перетворення хромосом без використання інформації про внутрішню структуру об'єкта досліджень.

Представлення топології мережі у вигляді хромосоми (дія 1 на рис. 1)

При застосуванні генетичного алгоритму для синтезу раціональної топології безпроводних самоорганізуючих мереж необхідно представити цю топологію у вигляді хромосоми, яка по суті являє собою математичну модель МР з відображенням її елементів та суттєвих зв'язків між ними.

Відомо [3], що достатньо адекватною для вирішення задачі дослідження топології МР є математична модель, яка зображується у вигляді матриці інцидентності, у якій номери рядків відповідають номерам джерел інформації, а номери стовпців – номерам споживачів інформації. Елементи a_{ij} на перетині рядків та стовпців набувають значення характеристики інформаційного зв'язку, що з'єднує відповідне джерело інформації з відповідним споживачем:

$$S = \begin{pmatrix} \text{джерела інформації} & \begin{matrix} \text{споживачі інформації} \\ \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \dots & J \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1J} \\ 2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I & a_{I1} & a_{I2} & a_{I3} & \dots & a_{IJ} \end{matrix} \end{matrix} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

(зауважимо, що одні і ті ж вузли можуть бути і джерелами, і споживачами інформації).

При числових розрахунках також виникає необхідність використання різновиду матриці інцидентності – ортонормованої матриці інцидентності, в якій значення елементів можуть набувати значення 0 або 1. Така матриця може бути використана у тому випадку, якщо для дослідження є необхідність визначити наявність інформаційних зв'язків між відповідними елементами структури системи без визначення характеристики зв'язку.

Нескладно побачити аналогію між відображенням топології мережі у матрицю виду (3) та відображенням точки простору рішень у двомірну хромосому, що має місце у генетичному алгоритмі. Ортонормована матриця інцидентності (3) є двомірною хромосомою і може використовуватись для представлення топології МР в генетичному алгоритмі.

Розвиваючи наведену вище аналогію, назвемо елементи матриці (3) генами, а декілька реалізацій матриці (3) з різними значеннями елементів (генів) – сукупністю хромосом, або популяцією. Зауважимо, що в загальному випадку структура хромосоми може бути і іншою. Це буде визначатись змістом задачі, що вирішується.

При визначенні числового значення характеристики зв'язків між елементами структури необхідно використовувати числові хромосоми, якщо ж визначається значення декількох характеристик зв'язку, необхідно використовувати векторну хромосому. Пояснимо роботу окремих складових методики докладніше.

Ініціалізація початкової популяції (дія 2 на рис. 2)

При ініціалізації початкової популяції $\Omega^{b(0)}$ випадковим чином створюються N_b хромосом – матриць виду (3). При цьому необхідно враховувати обмеження на вигляд матриць (3), що будуть визначатись характером задачі, що вирішується. Також обмеження на вигляд хромосоми повинні враховуватись при застосуванні оператора мутації, який полягає в заміні одного або декількох генів хромосоми, вибраної випадковим чином з множини $\Omega^{b(t)}$, на протилежне значення, що стосовно досліджуваної топології мережі означає створення або ж видалення зв'язків між її елементами.

В результаті у кожному циклі генетичного алгоритму формується популяція хромосом-мутантів $\Omega^{m(t)}$:

елементи стовбців – нулі;

інформація передається тільки на один вузол МР – це означає, що у відповідних рядках матриці може бути тільки одна одиниця, інші елементи рядків – нулі;

вузол МР може отримувати і обробляти дані не більше ніж від $N_{\text{ретр max}}$ вузлів-ретрансляторів МР та

передати інформацію не більше ніж $N_{\text{Взmax}}$ вузлам отримувачам.

Застосування операторів схрещування та мутації (дія 3 на рис. 1)

При схрещуванні хромосоми поточної популяції $\Omega^{b(t)}$ випадковим чином розбиваються на пари. Оператор схрещування здійснює обмін генів хромосом кожної пари. В результаті формується популяція хромосом-нащадків $\Omega^{c(t)}$ чисельністю N_c . Схрещування потрібно виконувати з урахуванням обмежень на вигляд матриці (3), щоб в результаті не отримати хромосоми, відповідні яким структури створити неможливо. В прикладі, наведеному нижче (рис. 2), застосований блочний оператор схрещування для двомірних хромосом. При схрещуванні хромосоми здійснюють обмін генами, розташованими на ділянці, положення якої визначається випадковим чином з врахуванням наведених вище обмежень.

Розпізнавання варіанту дій станції РЕП та оцінка ефективності (дія 5 на рис. 1)

Розпізнавання варіанту дій станції РЕП та оцінка ефективності при варіанті топології $S \in \Omega^{S(t)}$, де $\Omega^{S(t)} = \Omega^{b(t)} \cup \Omega^{c(t)} \cup \Omega^{m(t)}$, здійснюється з використанням мультиагентного алгоритму, запропонованого в [10, 11]. На кожному t -му циклі роботи генетичного алгоритму для кожної хромосоми S множини $\Omega^{S(t)}$ розпізнається варіант дій станції РЕП та оцінюється його ефективність. Наступним кроком циклу генетичного алгоритму є *вибір* кращих N_b хромосом з популяції $\Omega^{S(t)}$ за значенням цільової функції (1). Отримані хромосоми утворюють нову популяцію $\Omega^{b(t+1)}$, яка являється початковою для наступного циклу генетичного алгоритму.

Після виконання T циклів робота генетичного алгоритму припиняється.

Після проведення дії 9 на рис. 1 відбувається настроювання топології мережі наступним чином. Оцінювання топології мережі здійснюється на основі нечіткого логічного висновку відповідно до визначеної бази знань [12, 13]:

ЯКЩО $(x_1 = a_{1,j_1}) \text{ I } (x_2 = a_{2,j_1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_{n,j_1})$

з вагою w_{j_1} , АБО $(x_1 = a_{1,j_2}) \text{ I } (x_2 = a_{2,j_2}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_{n,j_2})$ з вагою w_{j_2} , АБО $(x_1 = a_{1,j_k})$

$(x_2 = a_{2,j_k}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_{n,j_k})$ з вагою w_{j_k} ,

ТО $y = d_j, j = \overline{1, m}$,

де a_{i,j_p} – нечіткий терм, яким оцінюється змінна x_i

в рядку з номером j_p ($p = \overline{1, k_j}$), тобто

$a_{i,j_p} = \int \mu_{j_p}(x_i)/x_i$; k_j – кількість рядків-кон'юнкцій, в яких вихід у оцінюється значенням d_j ;

$w_{j_p} \in [9, 1]$ – ваговий коефіцієнт правила з номером j_p .

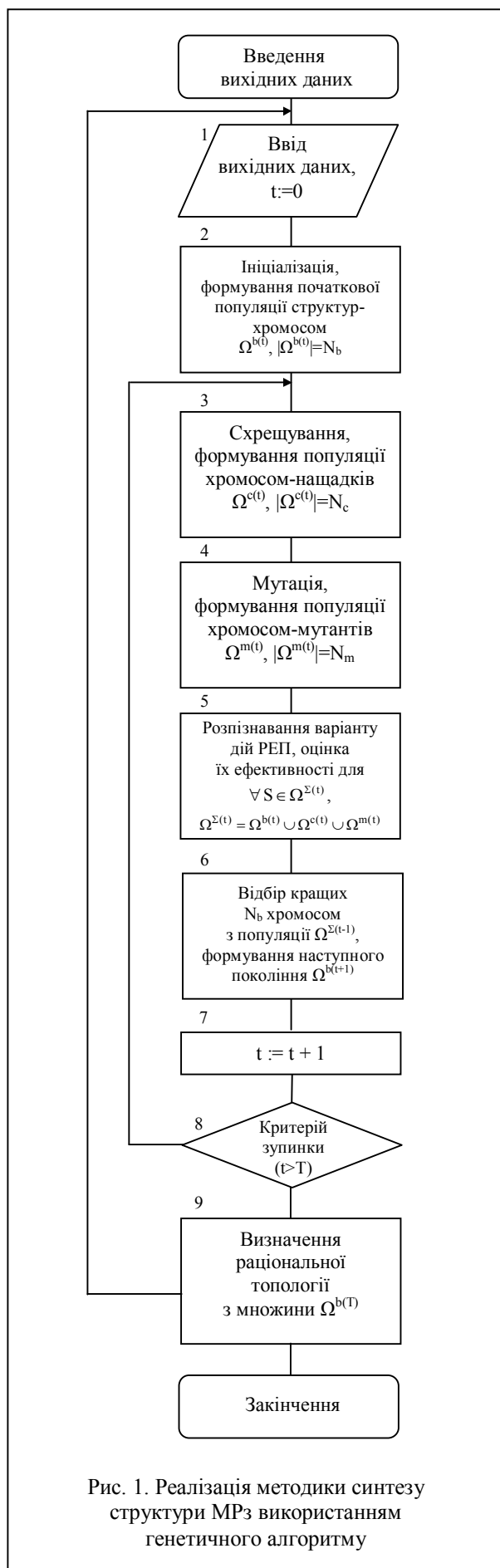


Рис. 1. Реалізація методики синтезу структури МРз використанням генетичного алгоритму

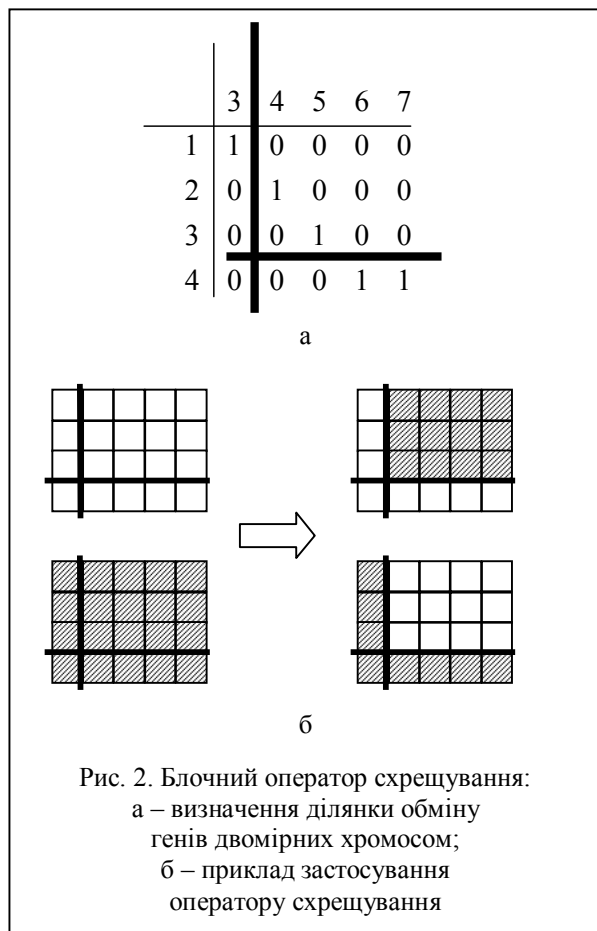


Рис. 2. Блочний оператор схрещування: а – визначення ділянки обміну генів двовірних хромосом; б – приклад застосування оператора схрещування

Проведення навчання системи

Функції відповідності класам d_j об'єкту $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ розраховуються так [12, 13]:

$$\mu_{d_j}(X^*) = \bigvee_{p=1, k_j} w_{jp} \cdot \bigwedge_{i=1, n} (\mu_{jp}(x_i^*)), j = \overline{1, m},$$

де $\mu_{jp}(x_i^*)$ – функція відповідності входу x_i^* нечіткому терму a_{ijp} ; $\bigwedge(\bigvee)$ – s-норма (t-норма), якій в задачах класифікації зазвичай відповідають максимум (мінімум).

В якості рішення вибрано клас з максимальною функцією відповідності розрахованого рішення $d_1 \dots d_m$ [12]:

$$y^* = \arg \max_{\{d_1, d_2, \dots, d_m\}} (\mu_{d_1}(X^*), \mu_{d_2}(X^*), \dots, \mu_{d_m}(X^*)).$$

Таким чином, буде виконана адаптація чи настроювання топології МР в умовах невизначеності [12, 13].

Аналіз значень цільової функції (1) для отриманої множини хромосом $\Omega^{(T)}$ дозволяє визначити одну чи декілька раціональних топологій мобільних самоорганізуючих мереж.

Висновки

Таким чином, у статті запропонована методика синтезу раціональної топології безпроводних самоорганізуючих мереж спеціального призначення з використанням генетичного алгоритму. Структура мережі представляється у вигляді двомірної матриці інцидентності. Ця матриця використовується як хромосома операторами генетичного алгоритму. Елементи матриці інцидентності, що описують зв'язки між елементами самоорганізуючої мережі, у генетичному алгоритмі являються генами. В кожному циклі генетичного алгоритму здійснюється попарне схрещування хромосом, в ході якого здійснюється обмін частини генів, що для досліджуваної мережі означає появу та зникнення відповідних зв'язків між елементами.

Розрахунок значень цільової функції (ступеню радіоелектронного подавлення) пропонується здійснювати з використанням мультиагентного алгоритму, при цьому для кожної хромосоми поточної популяції спочатку розпізнається варіант дій радіоелектронного подавлення.

Подальші дослідження будуть направлені на розробку удосконаленої методики управління конфігурацією мобільних самоорганізуючих мереж з урахуванням ступеню радіоелектронного подавлення.

Список літератури

1. Шишацький А.В. Розвиток інтегрованих систем зв'язку та передачі даних для потреб Збройних Сил / А.В. Шишацький О.М. Башкиров, О.М. Костина // *Озброєння та військова техніка : науково-техн. журнал*. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2015. – № 1 (5). – С. 35 – 40.
2. Романюк В.А. Направления развития тактических сетей связи / В.А. Романюк // *Зв'язок*. – 2001. – № 3. – С. 63–65.
3. Кувшинов О.В. Методология оперативного управления радиоресурсом военных систем радиозв'язку / О.В. Кувшинов // *V-та науково-технічна конференція*

„Приоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” 20-21 жовтня 2010 року, доповіді та тези доповідей. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2010. – С. 23 – 28.

4. Романюк В.А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами / В.А. Романюк // *Збірник наукових праць ВІТІ*. – Київ : ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2012. – № 1.– С. 109 – 117.

5. Романюк В.А. Архітектура системи оперативного управління тактичними радіомережами / В.А. Романюк // *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”*. – Київ : ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2009. – № 3.– С. 70 – 76.

6. Zheng R. Asynchronous Wakeup for Ad Hoc Networks / R. Zheng, J.C. Hou, L. Sha // *Proceedings of ACM Mobicom*. – 2003.

7. Karp B. Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks / B. Karp and H. T.Kung // *Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*. – 2000.

8. Kranakis E. Compass Routing on Geometric Networks / E. Kranakis, H. Singh, J. Urrutia // *Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry*. – 1999.

9. Bose P. Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks / P. Bose, P.Morin, I. Stajmenovic, J. Urrutia // *Wireless Networks*. – 2001. – Vol. 7. – P. 5 – 7.

10. Geometric Ad-Hoc Routing: Of Theory and Practice / F. Kuhn, R. Wattenhofer, Y. Zhong, A. Zollinger // *Proceedings of ACM PODC*. – 2003.

11. Douglas S. Location proxies and intermediate node forwarding for practical geographic forwarding / S. Douglas, D. Couto, R. Morris // *MIT Laboratory for Computer Science MIT-LCSTR-824*. – 2001.

12. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечёткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. – Винница : УНИВЕРСУМ, 1999. – 320 с.

13. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара; пер. с англ. И.Ф. Шахнова. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

Надійшла до редколегії 2.11.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Кувшинов, Управління нормативно-методичного забезпечення та моніторингу володіння, використання та розпорядження нерухомого майна і земель, Київ.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА РАЦИОНАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ БЕСПРОВОДНЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

А.В. Шишацкий, Н.Г. Кучук, Е.Н. Прокопенко

В работе предложена методика синтеза рациональной топологии беспроводных самоорганизующихся сетей специального назначения с использованием генетического алгоритма. Указанная методика позволяет значительно уменьшить время принятия решения на определение рациональной топологии беспроводных самоорганизующихся сетей и позволяет учитывать варианты ведения радиоэлектронного подавления.

Ключевые слова: генетический алгоритм, искусственный интеллект, оптимизация, маршрут, самоорганизующиеся сети, маршрутизация.

THE METHOD OF SYNTHESIS OF RATIONAL TOPOLOGY OF WIRELESS SELF-ORGANIZING NETWORKS OF SPECIAL PURPOSE WITH USING THE GENETIC ALGORITHM

A.V. Shishatsky, N.H. Kuchuk, Ye.M. Prokopenko

In this paper, we propose a technique for synthesizing the rational topology of wireless self-organizing networks of a special purpose using a genetic algorithm. This technique allows to significantly reduce the decision time for determining the rational topology of wireless self-organizing networks and allows to take into account the variants of conducting electronic suppression.

Keywords: genetic algorithm, artificial intelligence, optimization, route, self-organizing networks, routing.

Актуальні питання навчання

УДК 519.6 + 519.8

И.В. Лысенко

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ, ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ «КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ»

Сформулированы предложения и рекомендации относительно содержания и преподавания математических и математически ориентированных дисциплин студентам, обучающимся по специальности «Компьютерная инженерия». Рассмотрены разделы математики, необходимые для изучения дисциплин, формирующих выпускника-бакалавра или магистра в области компьютерной инженерии. Обоснована целесообразность использования систем компьютерной математики в процессе изучения математически ориентированных дисциплин

Ключевые слова: компьютерная инженерия, системы компьютерной математики.

Введение

Вопрос важности и актуальности математической подготовки современного специалиста в области информационных технологий (ИТ) не требует обоснований, а поскольку компьютерная инженерия представляет собой одну из важных компонент ИТ, то это касается и собственно компьютерной инженерии.

Вполне очевидно, что подготовка бакалавров и магистров по всем специальностям, входящим в направление «Информационные технологии», предполагает существование некоего общего для них ядра математических и математически ориентированных дисциплин (например, такие разделы дискретной математики, как теория множеств, теория графов, комбинаторика; теория вероятностей и математическая статистика; теория информации и кодирования и др.). В то же время, специфика каждой специальности обуславливает необходимость, как делать акценты на некоторых из тех разделов математики, которые входят в упомянутое «ядро», так и изучать те её разделы, знание которых не является необходимым для других специальностей.

В этой связи **цель статьи** состоит в том, чтобы сформулировать предложения и рекомендации относительно содержания и преподавания математических и математически ориентированных дисциплин студентам, обучающимся по специальности «Компьютерная инженерия».

О преподавании математических и математически ориентированных дисциплин

Очевидно, что содержание математических дисциплин должно определяться целями изучения и содержанием профильных дисциплин, т.е. дисциплин,

формирующих облик специалиста по компьютерной инженерии. Кроме того, при формировании содержания математических дисциплин необходимо учитывать цели преподавания математики в техническом ВУЗе. По мнению авторов книги «Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов», к числу таких целей следует отнести: сообщить студентам теоретические сведения, необходимые для изучения общенаучных, общеинженерных и специальных дисциплин и последующего приложения математики, и обучить их соответствующему математическому аппарату; развить логическое и алгоритмическое мышление; выработать умение самостоятельно разбираться в математическом аппарате, содержащемся в литературе, связанной со специальностью студента и др. [1, с. 222-223]. Также авторы отмечают, что «содержание курса математики должно быть достаточно широким и глубоким для эффективного решения задач по специальности». Нам импонирует точка зрения выдающегося физика лауреата Нобелевской премии Л.Д. Ландау, который в ответ на просьбу программы по математике, составленной для одного из физических факультетов, писал: "Мне кажется, что давно пора обучать физиков тому, что они сами считают нужным для себя, а не спасать их души вопреки их собственному желанию" [1, с. 224]. Акцентируя внимание на том, что "физики, как известно, нуждаются в считающей аналитической математике", он полагал, "что из математики, изучаемой физиками, должны быть полностью изгнаны всякие теоремы существования, слишком строгие доказательства и т.д.". А аргумент, что с помощью такой (ненужной) математики студенты учатся логически мыслить, он считал схоластической увёрткой. Разделяя в целом подход Л.Д. Ландау, можно утверждать, что математика, нужная специалисту по компьютерной инженерии,

рии, это преимущественно *дискретная математика* и её приложения.

Показательно в этом отношении название книги [2] – «Компьютерная математика». В неё включены такие разделы: «Множества», «Отношения», «Функции», «Основные понятия арифметики», «Алгебраические структуры», «Матрицы», «Теория графов», «Языки и грамматики», «Конечные автоматы», «Компьютерная геометрия». А вот разделы книги «Дискретная математика для инженера» [3]: «Множества, функции, отношения», «Элементы общей алгебры», «Введение в логику», «Графы», «Теория алгоритмов», «Формальные системы», «Языки и грамматики», «Автоматы», «Комбинаторные задачи и трудоёмкость вычислений», «Линейное программирование».

Обращает на себя внимание отсутствие в этих книгах раздела «Комбинаторика», наличие которого, по нашему мнению, было бы более уместно, чем разделов «Компьютерная геометрия» в [2] и «Линейное программирование» в [3] (что касается последнего, то его логично было бы рассмотреть в дисциплине, связанной с изучением методов оптимизации (математического программирования)). Таким образом, по нашему мнению, ядро дисциплины "Дискретная математика" должны составлять разделы: «Множества, отношения и функции», «Комбинаторика», «Графы», «Алгебраические структуры», «Основы теории алгоритмов». В то же время, представляется целесообразным наличие отдельного курса "Формальные системы, грамматики и автоматы". Взаимосвязь между разделами показана на рис. 1.

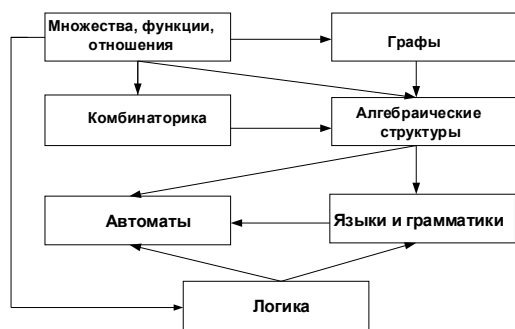


Рис. 1. Взаимосвязь между разделами

Деление дисциплин на математические и математически ориентированные вполне естественно, если под первыми понимать дисциплины из категории «чистой» математики, а под вторыми – те из них, которые имеют прикладное значение и в их основе лежат те или иные понятия, разделы, направления математики «чистой». Примерами первой могут быть «Высшая математика» и «Дискретная математика», а второй – «Теория информации и кодирования» и «Теория принятия решений» (или «Исследование операций»).

Что касается «чистых» математических дисциплин, входящих в план подготовки бакалавра по компьютерной инженерии, то, на наш взгляд, их содержание должно быть таким:

1. «Высшая математика». В основу должны быть положены разделы: линейная алгебра и её приложения, включая основы теории матриц и решение систем линейных алгебраических уравнений (для изучения этих разделов (тем), как нам представляется, должно быть отведена большая часть времени, отводимого на изучение дисциплины); интегральное и дифференциальное исчисление; решение дифференциальных уравнений и их систем; числовые и функциональные ряды (главным образом – ряды Фурье и преобразование Фурье).

2. «Дискретная математика». Как было отмечено выше, основу курса должны составлять такие классические разделы, как множества, отношения и функции; комбинаторика; графы; основы теории алгоритмов. Представляется целесообразным в рамках основ теории множеств рассмотреть базовые положения теории нечётких множеств. В то же время, такой «классический» раздел дискретной математики, как математическая логика, было бы целесообразным, по нашему мнению, включить в качестве компонента дисциплины «Логика», другими составляющими которой могли бы быть: Аристотелева силлогистика; классическая (дедуктивная) логика (логика высказываний и логика предикатов); основы теории доказательств; некоторые неклассические логики (индуктивная (вероятностная) логика и правдоподобные рассуждения, нечёткая логика, модальная логика).

В частности, о важности способности к доказательному рассуждению хорошо заметил академик В.И. Арнольд: «Роль доказательств в математике подобна роли орфографии и даже каллиграфии в поэзии. Тот, кто не научился искусству доказательства, не способен отличить правильное рассуждение от неправильного. Такими людьми легко манипулировать безответственным политикам. Результатом могут стать массовый психоз и социальные потрясения» [4]. Очевидно, что сказанное в высшей степени справедливо для специалиста в сфере информационной безопасности, особенно расширенном толковании этого понятия, когда сама информация выступает не только объектом воздействия со стороны злоумышленника, но и как средство воздействия на субъектов, что может иметь место, например, при использовании злоумышленниками методов социальной инженерии.

3. «Теория вероятностей и математическая статистика». Содержательное наполнение данной дисциплины может быть тем же, что и для тех, кто обучается по другим специальностям направления «Информационные технологии», может быть лишь с большим акцентом на изучение вопросов, связанных с методами обработки и анализа результатов эксперимента (корреляционный, регрессионный и дисперсионный анализ, проверка статистических гипотез), что будет востребовано при изучении магистерского курса «Методы исследования и моделирования компьютерных систем и сетей». Кроме того, было бы

логичным в рамках данного курса рассмотреть базовые понятия теории случайных процессов в связи с последующим использованием их при изучении методов аналитического и имитационного моделирования в рамках магистерского курса «Методы исследования и моделирования компьютерных систем и сетей», а также для оценки характеристик надёжности компьютерных систем и сетей при изучении курса «Надёжность и отказоустойчивость компьютерных систем». В этой связи, представляется вполне уместным назвать этот курс как «Основы теории вероятностей, математической статистики и случайных процессов».

Математически ёмкими (в нашей терминологии – математически ориентированными) являются дисциплины: «Алгоритмы и методы вычислений», «Теория информации и кодирования», «Надёжность и отказоустойчивость компьютерных систем».

На наш взгляд, в курс «Алгоритмы и методы вычислений» целесообразно включить следующие темы: интерполяция (локальная и глобальная) и аппроксимация (на основе метода наименьших квадратов) функциональных зависимостей; системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (типы СЛАУ и условия их совместности, точные и приближённые методы решения); базовые понятия элементарной теории чисел и теоретико-числовые алгоритмы (необходимость данной темы обусловлена потребностью изучения несимметричных криптографических алгоритмов защиты данных, изучаемых в курсе «Защита информации в компьютерных системах и сетях»); непрерывная (линейная и нелинейная) и дискретная (комбинаторная и целочисленная) оптимизация (постановка наиболее распространённых задач оптимизации и точные и приближённые методы их решения. При этом изучение задач дискретной оптимизации и методов (алгоритмов) их решения, как наиболее актуальных для специалистов в области компьютерной инженерии, следует вести, как по принципу «от задачи к методу (алгоритму)», так и – «от метода (алгоритма) к задаче». Например, рассматривая, наверное, самую хорошо изученную задачу комбинаторной оптимизации – задачу коммивояжёра – можно изучить в сопоставительном контексте как точные методы её решения (такие, как метод ветвей и границ и метод динамического программирования), так и приближённые (такие, как «жадный» и генетический алгоритм). В то же время, было бы целесообразно проиллюстрировать, как, например метод динамического программирования может быть применён для решения разных задач, таких как, задача о рюкзаке, коммивояжёра, поиска экстремального пути графа и т.д.

Также при изучении задач и методов комбинаторной оптимизации следует делать акцент на взаимосвязь между изучаемыми задачами (например, двойственность некоторых из них) и подчёркивать, что одна и та же задача может быть сформулирована в разных терминах (на разных языках). Например, задача о назначении и задача коммивояжёра могут быть сформулиро-

ваны как на языке теории графов, так и на языке линейного программирования (в первом случае – булевого, а во втором – смешанного (частично-целочисленного)). Иными словами, можно говорить, о сведениях, например, задачи коммивояжёра, сформулированной на языке теории графов, к задаче смешанного линейного программирования, а задачи о назначении – к задаче булевого линейного программирования.

В отношении дисциплины «Теория информации и кодирования» следует отметить, что для её эффективного изучения требуется знание таких разделов математики, как основы теории вероятностей и теории колец и конечных полей (преимущественно полиномиальных колец и полей, т.к. именно они представляют собой удобный математический аппарат для описания одного из подклассов линейных кодов – полиномиальных циклических кодов, а также – для описания линейных сдвиговых регистров с обратными связями, находящих применение в скремблирующих устройствах).

Что касается дисциплины «Надёжность и отказоустойчивость компьютерных систем», то для её изучения необходимо знание основ теории вероятностей и случайных процессов (прежде всего – Марковских случайных процессов при изучении резервированных восстанавливаемых систем) для вычисления значений показателей надёжности и отказоустойчивости аппаратных средств, программного обеспечения и системы в целом. Что же касается *магистерской* подготовки, то математически ёмкими в этом случае являются дисциплины «Методы исследования и моделирования компьютерных систем и сетей» и «Методы искусственного интеллекта».

В рамках курса «Методы исследования и моделирования компьютерных систем и сетей» представляется целесообразным изучение вопросов, связанных с аналитическим и (преимущественно) имитационным моделированием на основе математического аппарата: теории случайных процессов (Марковских и полумарковских); систем массового обслуживания; сетей Петри; случайных графов.

Что же касается дисциплины «Методы искусственного интеллекта», то основное её содержание, по нашему мнению, должно составлять изучение искусственных нейронных сетей и их приложений в компьютерной инженерии.

Полагаем также, что для студентов, обучающихся в магистратуре, необходимо знание основ теории принятия решений в силу того, что специалистам по компьютерной инженерии и сетевым технологиям приходится решать вопросы, связанные с проектированием, администрированием и, отчасти, защищённостью компьютерных сетей. Этот курс, который мог бы быть так и назван – «Основы теории принятия решений», мог бы включать в себя такие разделы, как: основы теории игр, основы принятия решений в условиях неопределённости, основы по-

строения систем поддержки принятия решений, неформальные процедуры принятия решений.

Использование систем компьютерной математики в подготовке специалистов по компьютерной инженерии

К числу наиболее популярных систем компьютерной математики СКМ относятся Matlab, Mathematica, Maple, Mathcad. Эти программные системы содержат богатые возможности по решению всевозможных задач из различных областей и направлений, как чистой, так и прикладной математики. При обучении будущих специалистов по компьютерной инженерии они могут быть востребованы, в частности: для интерполяции и аппроксимации функциональных зависимостей; для решения СЛАУ и систем дифференциальных уравнений (например, описывающих представленную графом некоторую Марковскую модель); для проверки статистических гипотез и выполнения корреляционного, регрессионного и дисперсионного анализа при статистической обработке результатов имитационного эксперимента; при решении задач оптимизации различных типов (анализ возможностей решения задач оптимизации в рамках СКМ Matlab, Mathematica, Maple, Mathcad сделан в работе [5]). Кроме того, некоторые СКМ, в частности Matlab, могут быть использованы для решения задач цифровой обработки сигналов, автоматической генерации кода для ПЛИС и микроконтроллеров при построении высокопроизводительных программно-аппаратных систем, параллельных вычислений и т.д.

Заклучение

Содержание математических дисциплин должно определяться целями изучения математически ориентированных и других дисциплин, формирующих облик специалиста в сфере по компьютерной инженерии.

Математически ёмкими являются дисциплины: "Алгоритмы и методы вычислений", "Теория информации и кодирования" и "Надёжность и отказоустой-

чивость компьютерных систем" для подготовки бакалавров и курсы "Методы исследования и моделирования компьютерных систем и сетей" и "Методы искусственного интеллекта" - для магистров.

Целесообразно ввести дисциплины "Логика" и "Теория принятия решений" для магистров с целью привития будущим специалистам по компьютерной инженерии навыков логически выверенного системного мышления, необходимых при решении практических задач в своей предметной области.

Видится целесообразным увеличить объём дисциплины "Дискретная математика" за счёт сокращения времени, отводимого на изучение курса "Высшая математика".

В ходе изучения «чистых» математических и математически ориентированных дисциплин целесообразно использовать системы компьютерной математики, содержащие широкий набор встроенных функций для решения самых разнообразных задач в рамках упомянутых дисциплин, а также позволяющих решать задачи моделирования и проектирования компонентов программно-аппаратного обеспечения компьютерных систем и сетей.

Список литературы

1. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. *Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов.* – К.: Наукова думка, 1976. – 272 с.
2. Кук Д., Бейз Г. *Компьютерная математика / Пер. с англ.* – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 384 с.
3. Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. *Дискретная математика для инженера.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 480 с.
4. Губарев В. Академик В.И. Арнольд: путешествие в хаосе // *Наука и жизнь.* – 2000. – №12. – с.4-10.
5. Лысенко И.В., Бутенко В.О. *Анализ возможностей решения задач оптимизации средствами систем компьютерной математики [Текст] // Системи обробки інформації.* – Х: ХУПС, 2016. – Вип. 5(142). – С. 133–136.

Надійшла до редколегії 21.09.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків.

ПРО МАТЕМАТИЧНУ ПІДГОТОВКУ СТУДЕНТІВ, ЯКІ НАВЧАЮТЬСЯ З СПЕЦІАЛЬНОСТІ «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ»

I.V. Lysenko

Сформульовано пропозиції і рекомендації щодо змісту викладання математичних та математично орієнтованих дисциплін студентам, які навчаються з спеціальності «Комп'ютерна інженерія». Розглянуто розділи математики, необхідні для вивчення дисциплін, що формують випускника-бакалавра або магістра в галузі комп'ютерної інженерії. Обґрунтовано доцільність використання систем комп'ютерної математики в процесі вивчення математично орієнтованих дисциплін.

Ключеві слова: комп'ютерна інженерія, системи комп'ютерної математики.

ABOUT MATHEMATICAL TRAINING OF THE STUDENTS WHO LEARN ACORDING TO THE SPECIALTY "COMPUTER ENGINEERING"

I.V. Lysenko

Propositions and recommendations relatively content and teaching of the mathematic and mathematic oriented disciplines for students training on specialty "Computer engineering" are formulated. The mathematics chapters necessary for studying of the disciplines that form of the bachelors and masters in the sphere of computer engineering are considered. Advisability of using of the systems of computer mathematics during studying of the mathematic oriented disciplines are justified.

Key words: computer engineering, systems of computer mathematics.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Агазаде Т.Х.	238	Ковалець І.В.	224	Петренко О.М.	251
Андреев С.М.	4	Коваль М.О.	122	Письменецький В.О.	85
Арделян В.В.	171	Ковтун А.В.	103	Подошвелев Ю.Г.	113
Бабій Ю.О.	215	Колумбет В.П.	219	Поповський В.В.	154
Барабаш О.В.	118, 122	Кондратенко О.П.	190	Потапова М.В.	177
Баришев І.В.	24	Кононов В.Б.	41	Прокопенко Є.М.	260
Басюк І.А.	167	Кононова О.А.	45	Рак В.С.	45
Берднік П.Г.	190	Коржов І.М.	76	Рассомахін С.Г.	57
Бичков О.С.	171	Косенко В.В.	185	Рахімі Я.	197
Бойков І.В.	103	Кравченко Ю.В.	122	Решетник В.М.	37
Бороздин Н.К.	28	Кривобока Г.І.	89	Романова Т.С.	131
Боряк Б.Р.	255	Криховецький Г.Я.	141	Рубан І.В.	150
Браславець С.П.	45	Кропачек О.Ю.	76	Рудь П.О.	163
Волосюк В.К.	32	Кучук Г.А.	141	Сабадаш В.А.	145
Вольвач Є.О.	158	Кучук Н.Г.	260	Саланда І.П.	118
Вонсович М.А.	24	Левченко Л.О.	219	Свид І.В.	202
Гейко Г.В.	65	Лисенко І.В.	265	Сільвестров А.М.	89, 255
Гіль М.І.	94	Лісогорський Б.А.	49	Скулиш М.А.	158
Глива В.А.	219	Лобанов Л.П.	145	Собчук А.В.	122
Глоба Л.С.	158	Лукова-Чуйко Н.В.	118	Сокол Г.В.	154
Головняк Д.В.	15	Любарський Б.Г.	251	Стоян Ю.Є.	131
Гонтар М.М.	107	Мавріна М.О.	163	Таган О.О.	28
Данова М.О.	177, 210	Мандрікова Л.В.	177	Таран І.А.	49
Дмитрієнко В.Д.	65	Мартовицький В.О.	150	Темніков В.О.	206
Дорогобид В.П.	28	Мезенцев М.В.	65	Тиртишніков О.І.	163
Дубницький В.Ю.	98	Михаленко В.С.	41	Ткачова О.Б.	136
Дуравкін Є.В.	136	Місюк Г.В.	15	Триснюк В.М.	233
Ємельянов М.А.	85	Могілатенко А.С.	190	Тютюник В.В.	238
Жигилій С.М.	70	Монго Б.В.	53	Угарова А.С.	4
Жила С.С.	32	Морозов О.О.	81	Філатова Л.Д.	98
Жилін В.А.	4	Морозова О.І.	194	Фролов А.В.	85
Заволодько Г.Е.	53	Мсаллам Є.П.	24	Хижняк І.А.	61
Запорожець О.І.	224	Мусієнко А.П.	118	Хлуд О.М.	127
Зима О.Є.	70	Мухі-Алдіні Х.М.	136	Ходирев О.І.	98
Іванова В.І.	19	Науменко А.М.	41	Худов Г.В.	49
Іванченко А.О.	103	Невлюдов І.Ш.	85	Чала О.О.	85
Іванченко О.В.	103	Нелюба Д.М.	107	Чалий В.В.	15
Ічанська Н.В.	113	Нікітін А.А.	233	Чорногор Л.Ф.	238
Казаков Є.Л.	37	Ніколаєв К.Д.	219	Чуб І.А.	247
Казаков О.Є.	37	Новожилова М.В.	247	Чугай А.М.	131
Калімулін Т.М.	15	Носков В.І.	65	Шефер А.В.	9
Калугін В.Д.	238	Обідін Д.М.	190	Шишацький А.В.	260
Капітан Р.Б.	210	Обод А.І.	202	Шостак І.В.	210
Карпенко М.Ю.	247	Обод І.І.	53	Шумейко В.О.	233
Кассем Халіфе	141	Островерхов М.Я.	89	Щербина К.О.	24
Кацал Д.І.	177	Павліков В.В.	32	Ярцев В.П.	145
Кацман М.Д.	224	Панкратов О.В.	131	Яськов Г.М.	127
Князев Є.І.	57	Пацук В.М.	94		
Коваленко О.В.	181	Педько М.С.	70		

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 6 (46)

Відповідальна за випуск *К. С. Козелкова*

Технічний редактор *Т. В. Уварова*

Коректор *О. В. Морозова*

Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

Оформлення обкладинки *І. В. Льїна*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.

Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 33,75. Тираж 200 прим. Зам. 1130-17

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (066) 706-18-30
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис № 2480000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34
e-mail: bookfabrik@mail.ua