



СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

6(58) ' 2019

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:
kozelkova@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:

КОСЕНКО Віктор Васильович (д-р техн. наук, проф., Полтава)

Заступник голови:

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

ШЕФЕР Олександр Віталійович (д-р техн. наук, доц., Полтава)

Члени:

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

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

ГАВРИЛКО Євген Володимирович (д-р техн. наук, доц., Київ)

ГЛИВА Валентин Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Київ)

КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Харків)

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

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

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

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

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., Київ)

ПАВЛЕНКО Максим Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Харків)

СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович (д-р техн. наук, проф., Харків)

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

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

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

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

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

ШЛОМЧАК Георгій Григорович (д-р техн. наук, проф., Дніпро)

Відповідальний секретар:

КУЧУК Ніна Георгіївна (канд. пед. наук, доц., Харків)

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 від 28 грудня 2019 року № 8)

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

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

З М І С Т

НАВИГАЦІЯ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

<i>Федоров А. В., Худов Г. В., Ковалевський С. М., Зоц Ф. Ф., Тахьян К. А.</i> Оцінка можливостей використання технологій MLAT та приймачів ADS-B для підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів	3
--	---

КОНТРОЛЬ КОСМІЧНОГО ТА ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

<i>Васюта К. С., Чопенко Д. А.</i> Розробка моделі використання ресурсів у відкритій експертній системі пункту управління Повітряних Сил	9
<i>Колесник А. В., Захарченко І. В., Берднік П. Г.</i> Моделювання процесів розвитку ситуації при відмові двигуна на повітряному судні в польоті	15

УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Кійко С. Г., Дружинін Є. А., Прохоров О. В.</i> Імітаційне моделювання процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства	20
<i>Kononov V., Kononova O., Odinokii I.</i> Designing the principal transmission scheme fiber optic device fiber optical gyroscope	28
<i>Sedlacek P., Forgas A., Zaitseva E.</i> New matrix based algorithm for calculation of importance measures	33

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Барабаш О. В., Галахов Є. М.</i> Визначення оптимального часу проведення спеціального аудиту за умови еластичності та чутливості функції інтенсивності кібератак	38
<i>Коваленко О. В.</i> Математична модель технології тестування вразливості до SQL ін'єкцій	43
<i>Кучук Н. Г.</i> Синхронізація інформаційної структури мережі на гіперконвергентній платформі з обчислювальними ресурсами її вузлів	48
<i>Маковейчук О. М.</i> Метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності	54
<i>Мелешко Є. В., Хох В. Д., Босько В. В.</i> Дослідження матричних факторизаційних моделей рекомендаційних систем	58
<i>Мілов О. В., Костяк М. Ю., Мілевський С. В., Погасій С. С.</i> Засоби моделювання поведінки агентів в інформаційно-комунікаційних системах	63
<i>Наконечний О. В.</i> Інтегральний показник оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави	71
<i>Skakalina E.</i> Application of ant optimization algorithms in the solution of the routing problem	75
<i>Собчук В. В.</i> Методика створення єдиного інформаційного простору на виробничому підприємстві з функціонально стійким технологічним процесом	84
<i>Тарасенко Я. В.</i> Метод контент-аналізу семантичної частки в текстах з ознаками психолінгвістичного впливу	92
<i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О., Лециньська І. О.</i> Моделювання пояснень щодо рекомендованого переліку об'єктів з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача	97

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Глива В. А., Панова О. В., Тихенко О. М., Левченко Л. О., Колумбет В. П.</i> Дослідження амплітудно-частотних залежностей захисних властивостей магнітних екранів на основі аморфних сплавів	102
---	-----

ЗВ'ЯЗОК ТА РАДІОЛОКАЦІЯ

<i>Кузнєцов О. Л., Артеменко А. М., Петрушенко В. М., Карлов А. Д.</i> Оцінювання можливостей забезпечення заданої точності вимірювання радіальної швидкості цілі когерентно-імпульсними РЛС за межами дальності прямої видимості	106
<i>Серков О. А., Трубочанінова К. А., Лазуренко Б. О.</i> Метод оцінки імовірності бітової похибки в системах надширококутвого зв'язку	111
<i>Shefer O., Topikha B., Shefer V., Myhal S.</i> Synthesis of inventories to the interference of information and telecommunication systems	115
<i>Шило С. Г., Головяк Д. В., Хмелевський С. І., Тімочко О. О.</i> Метод сумісної обробки координатної та ознакової інформації в системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення	123
<i>Shyshatskyi A., Sova O., Zhuravskiy Yu., Nalapko O., Sokil Yu., Ryndin Yu.</i> Analysis of approaches of influence of electronic warfare means on the on the network-centric control system	129

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	140
----------------------------------	-----

Навігація та геоінформаційні системи

УДК 656.045

doi: 10.26906/SUNZ.2019.6.003

А. В. Федоров, Г. В. Худов, С. М. Ковалевський, Ф. Ф. Зоц, К. А. Тахьян

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ MLAT ТА ПРИЙМАЧІВ ADS-B ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. Предметом статті є вивчення можливостей використання технологій MLAT та приймачів ADS-B для підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів. **Метою** є підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів за рахунок використання технології MLAT та системи приймачів ADS-B. **Завдання:** аналіз різницево-далекомірного алгоритму, пропозиції щодо реалізації технології мультилатерації з використанням приймачів ADS-B в інтересах радіотехнічних військ, стислий аналіз можливостей технології ADS-B, аналіз можливостей використання приймачів ADS-B для підвищення точності визначення координат повітряного об'єкта. Використовуваними **методами** є: методи радіолокації, методи теорії прийому та обробки сигналів, визначення координат повітряних об'єктів. Отримані такі **результати**. Визначено фактори, що впливають на точність визначення координат повітряних об'єктів. Встановлено можливість застосування технології автоматичного залежного спостереження та технології мультилатерації для підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів. Визначено інтервали відхилення часових затримок в залежності від розташування повітряного об'єкта відносно системи приймачів для забезпечення похибки визначення координат, що не перевищуватиме 300 м. Визначена залежність похибки визначення положення повітряного об'єкта від кількості приймачів. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Встановлено, що перевагами використання технології MLAT та системи приймачів ADS-B для визначення координат повітряного об'єкта є зменшення похибки визначення положення повітряного об'єкта. Використання технології MLAT та системи приймачів ADS-B не потребує внесення значних змін до існуючих засобів радіолокації. В свою чергу, використання технології MLAT та системи приймачів ADS-B є додатковим джерелом отримання інформації про повітряну обстановку. В подальших дослідженнях пропонується використання технології MLAT та системи приймачів ADS-B на позиціях радіотехнічних підрозділів при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки.

Ключові слова: ADS-B, MLAT, алгоритм, повітряна обстановка, залежне спостереження, контроль повітряного простору, координати, GPS.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. З розвитком та модернізацією засобів повітряного нападу, а також зі зростанням інтенсивності повітряного руху в зоні відповідальності радіотехнічних підрозділів знаходиться велика кількість повітряних об'єктів (ПО) як цивільного так і військового призначення, що безумовно, ускладнює виконання завдань з ведення якісного та ефективного радіолокаційного контролю (РЛК) повітряної обстановки в зоні огляду радіолокаційних станцій (РЛС) радіотехнічних військ (РТВ).

Можливості існуючих радіолокаційних засобів (РЛС різних діапазонів) щодо здійснення РЛК та видачі радіолокаційної інформації (РЛІ) з підвищеними вимогами до точності визначення координат ПО дещо обмежені [1-3].

У цей час в управлінні повітряним рухом (УПР) широко застосовується технологія мультилатерації (MLAT). Сутність технології MLAT полягає в тому, що система з декількох приймачів (мінімум трьох) здатна вимірювати координати повітряного об'єкта, навіть за умов, коли ПО не передає в простір інформацію про своє місцезнаходження. В якості

приймачів системи MLAT використовуються приймачі ADS-B [4].

Сутність ADS-B полягає в тому, що ПО, що обладнані відповідними транспондерами, самостійно періодично випромінюють радіоповідомлення, які вміщують поточні параметри польоту. Для прийому даних ADS-B від ПО використовуються досить дешеві та малогабаритні радіоприймачі. Застосування таких приймачів в підрозділах РТВ дозволяє значно підвищити якість ведення радіолокаційного контролю простору. Зокрема з'являється можливість підвищення точності визначення координат та отримання додаткової інформації про ПО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час майже 99% ПО, які знаходяться у повітряному просторі, обладнані транспондерами ADS-B та працюють в системі вторинної оглядової радіолокації для управління повітряним рухом (Radar Beacon System (RBS)) [4]. Технологія ADS-B фактично є елементом режиму "S" системи RBS.

Автоматичне залежне спостереження (ADS-B) – це технологія коопераційного спостереження, в якій ПО визначає своє місцезнаходження через супутникову систему навігації та поширює його у простір. Цю інформацію можуть отримувати як наземні

станції органів УПР, так і інші повітряні судна, що дає змогу екіпажам бути більш ситуаційно обізнаними [3].

Технологія ADS-B може функціонувати в двох режимах: "ADS-B Out" та "ADS-B In" [5].

В режимі "ADS-B Out" через бортовий передавач поширюється інформація про точне місцезнаходження, висоту та швидкість ПО, а також інші данні з бортових систем ПО.

В режимі "ADS-B In" приймається інформація з каналів FIS-B (польотно-інформаційного сервісу) та TIS-B (інформацію про інший рух), а також інші данні ADS-B, такі як пряме спілкування з ПО, які перебувають поблизу.

В порівнянні з сучасними радіолокаційними засобами данні про поточне положення ПО, що визначаються системою ADS-B, мають суттєво вищу точність через те, що координати ПО визначаються бортовим GPS навігатором.

Дискретність передачі координатних даних (2 рази за секунду) також суттєво менше дискретності даних від радіолокаційних засобів. Значення швидкості та курсу в більшості випадків також беруться з бортових GPS навігаторів, але можуть братися і з іншого бортового обладнання. В більшості випадків значення висоти береться з барометричного висотоміру ПО [5].

Для визначення координат ПО, який не передає своїх координат, доцільно використовувати технологію MLAT. По суті це відомий різницево-далекомірний багатопозиційний спосіб визначення координат. Для його використання потрібно обробляти сигнали щонайменше від трьох приймачів, маючих просторовий рознос та точну синхронізацію часу. Точна прив'язка часу (до 50 нс) може здійснюватися за допомогою GPS приймачів.

Відомо, що основними факторами, які впливають на точність визначення координат ПО, є [2]:

- тактико-технічні характеристики приймачів;
- відстань між приймачами системи;
- геометрична побудова системи приймачів з використанням технології MLAT;
- синхронізація приймачів в системі.

Якість роботи системи з використанням технології MLAT, в основному, залежить від точності синхронізації приймачів системи.

Технологію MLAT використовує широко відомий Інтернет ресурс "FlightRadar" [6], де здійснюється обробка сигналів від тисяч ADS-B приймачів.

Метою статті є підвищення точності визначення координат ПО за рахунок використання технології MLAT та системи приймачів ADS-B.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

На теперішній час розробці та впровадженню різницево-далекомірному алгоритму приділено досить багато уваги [7]. Правильна робота алгоритму є дуже значущою для ведення РЛК повітряного простору, так як від його якісного та точного функціонування в достатній мірі залежить точність визначення координати ПО, а, отже, з'являється можливість

отримувати більш детальну і точну інформацію про ПО, які знаходяться в зоні відповідальності радіолокаційних підрозділів.

Сутність різницево-далекомірного алгоритму. У повітряному просторі є об'єкт. Завданням є визначення його місця розташування (рис. 1).

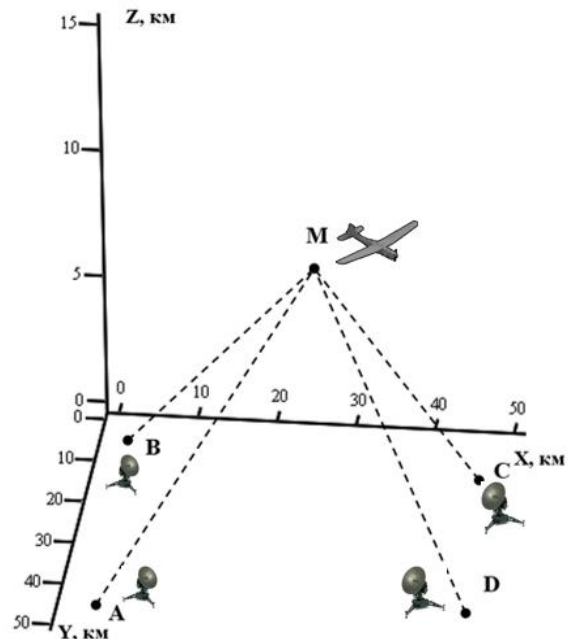


Рис. 1. Схема розміщення ПО в середині системи

На рис. 1 точкою М позначений об'єкт, точки А, В, С, D - наземні приймачі. Проведемо розрахунок відстаней від ПО до кожного з радіолокаторів. Різницево-далекомірний метод вимагає оцінки взаємних часових затримок поширення сигналу і передбачає синхронізований у часі прийом в декількох рознесених в просторі точках (приймачах). Для визначення різниці дальностей необхідно виміряти часові затримки між моментами приходу сигналів:

$$\begin{cases} \Delta R_{ij} = R_{iM} - R_{jM} = c \cdot (\tau_{iM} - \tau_{jM}) = c \cdot \Delta \tau_{ij}; \\ R_{iM} = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2 + (z_i - z_M)^2}; \\ R_{jM} = \sqrt{(x_j - x_M)^2 + (y_j - y_M)^2 + (z_j - z_M)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

де ΔR_{ij} - різниці відстаней між ПО і декількома приймачами, визначаються через вимірювання взаємних часових затримок поширення сигналів.

Далі знаходимо час приходу сигналу від літака до приймача за виразом (2):

$$t = R/c, \quad (2)$$

де c - швидкість поширення сигналу ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Розрахуємо часові затримки приходу сигналу на приймач А за виразом (3):

$$\Delta t = t - t_{MA}, \quad (3)$$

де t - час приходу сигналу на приймачі В, С, D.

Припустимо, що є еталонне місце розташування об'єкта, тобто область, в межах якої він знаходиться. Проводиться розбивка області з деяким кроком, проводиться розрахунок набору часових затримок для кожної можливої точки розташування об'єкта [7].

Коли всі часові затримки обчислені, проводиться обчислення суми квадратів різниць часових затримок: з кожного елемента матриці часових затримок віднімається задана часова затримка, результат зводиться в квадрат. Потім обчислюється сума матриць квадратів різниць часових затримок за виразом (4):

$$dt_{m,i} = (\Delta t_{m,iMA-MC} - \Delta t_{MA-MC})^2 + (\Delta t_{m,iMD-MC} - \Delta t_{MD-MC})^2 + (\Delta t_{m,iMB-MC} - \Delta t_{MB-MC})^2, \quad (4)$$

де $\Delta t_{MA-MC}, \Delta t_{MD-MC}, \Delta t_{MB-MC}$ – часові затримки щодо приходу сигналу на радіолокатор А,

$\Delta t_{m,iMA-MC}, \Delta t_{m,iMD-MC}, \Delta t_{m,iMB-MC}$ – розраховані матриці часових затримок.

Мінімальній сумі квадратів різниць буде відповідати найбільш точне місце розташування об'єкта.

Водночас не слід забувати про присутність в реальному середовищі різних шумів та їх вплив на точність визначення координат ПО. Розглянемо вплив адитивного шуму, при якому часові затримки будуть відрізнятися на випадкові величини, задані нормальним розподілом. Змінюючи середньоквадратичне відхилення випадкової величини нормального розподілу, розглядаємо похибки визначення координат.

Розглянемо три варіанти розміщення ПО відносно приймальних станцій. Для випадку, коли об'єкт знаходиться всередині системи (рис. 1), побудуємо графік залежності похибки координат від середньоквадратичного відхилення випадкової шумовий поправки. Графік наведено на рис. 2.

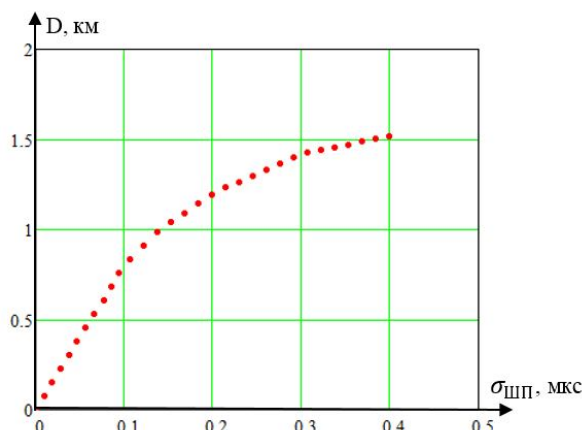


Рис. 2. Графік залежності похибки координат від середньоквадратичного відхилення випадкової шумовий поправки

З рис. 2 робимо висновок, що відхилення часових затримок на 0.14 мкс здатне викликати похибку

у визначенні координат практично на 1 км. Якщо прийняти за допустиму похибку визначення координат 300 м, то робимо висновок, що в ситуації, коли ПО знаходиться всередині системи, допускається відхилення часових затримок приблизно на 0.04 мкс.

Розглянемо інші випадки розташування ПО щодо різницево-daleкомірної системи. Для випадку знаходження об'єкта на краю системи (рис. 3) побудований аналогічний графік, він представлений на рис. 4.

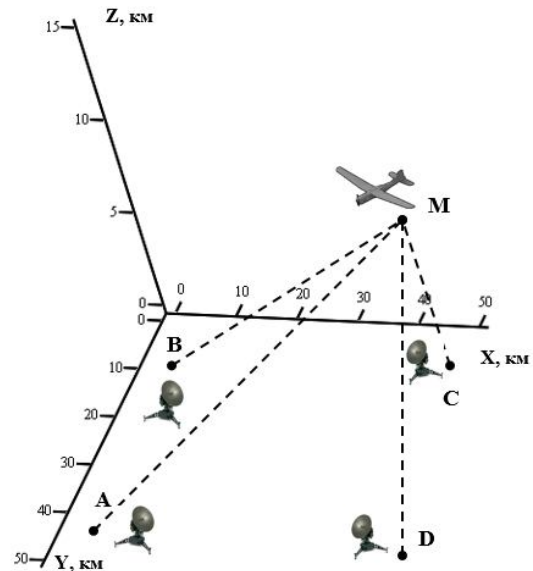


Рис. 3. Схема розміщення ПО на краю системи

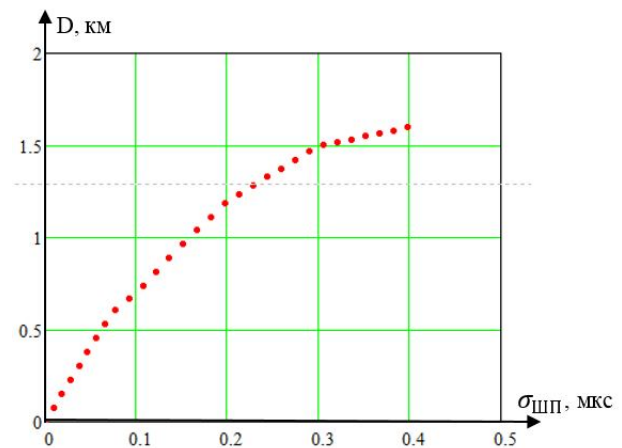


Рис. 4. Графік залежності похибки координат від середньоквадратичного відхилення випадкової шумовий поправки

У разі, коли ПО знаходиться на краю системи, допускається поправка в часових затримках порядку 0.05 мкс, що відповідає 300 м похибки у визначенні координат.

Проведемо дослідження для знаходження місця розташування ПО за межами системи радіолокаторів. Така схема розміщення показана на рис. 5. Графік залежності похибки координат від середньоквадратичного відхилення випадкової шумовий поправки наведено на рис. 6.

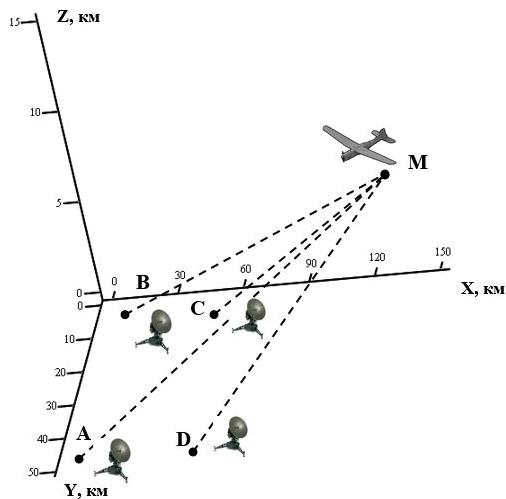


Рис. 5. Схема розміщення ПО на краю системи

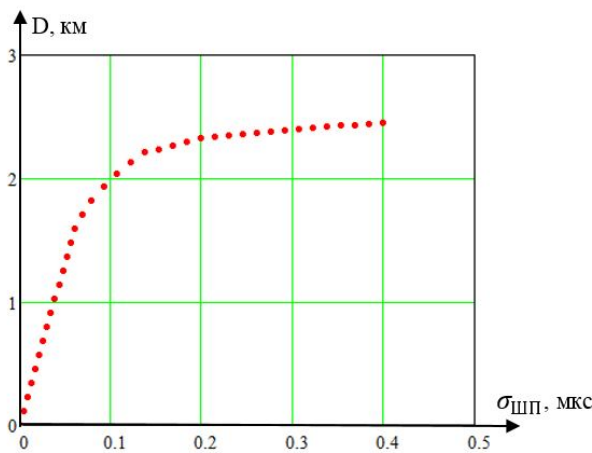


Рис. 6. Графік залежності похибки координат від середньоквадратичного відхилення випадкової шумової поправки

Слід зауважити, що похибки визначення координат навіть при невеликих середньоквадратичних відхиленнях випадкових поправок досить високі. Для того, щоб похибка визначення координат не перевищила 300 м, необхідно, щоб відхилення часових затримок не була більше 0.02 мкс у випадку з ПО, що знаходяться на межах даної системи.

Таким чином, в реальних умовах на визначення координат з достатньою точністю впливає не тільки шумовий компонент, але і розташування об'єкта щодо системи радіолокаторів. Алгоритм розрахунку координат ПО наведено на рис. 7.

Розглянемо кожен з етапів обробки сигналів докладніше: На першому етапі виявлення сигналів полягає у виявленні преамбули. Для знаходження преамбули використовується функція взаємної кореляції між прийнятим і опорним сигналом. На другому етапі (розпізнавання ПО) проводиться декодування інформації. Визначається номер борту ПО та інші дані. На третьому етапі визначаються часові затримки. Визначення часових затримок проводиться виміром моменту приходу сигналу на приймачі. Вимірювання моментів приходу можна зробити за допомогою алгоритму взаємної кореляційної обробки прийнятих сигналів.

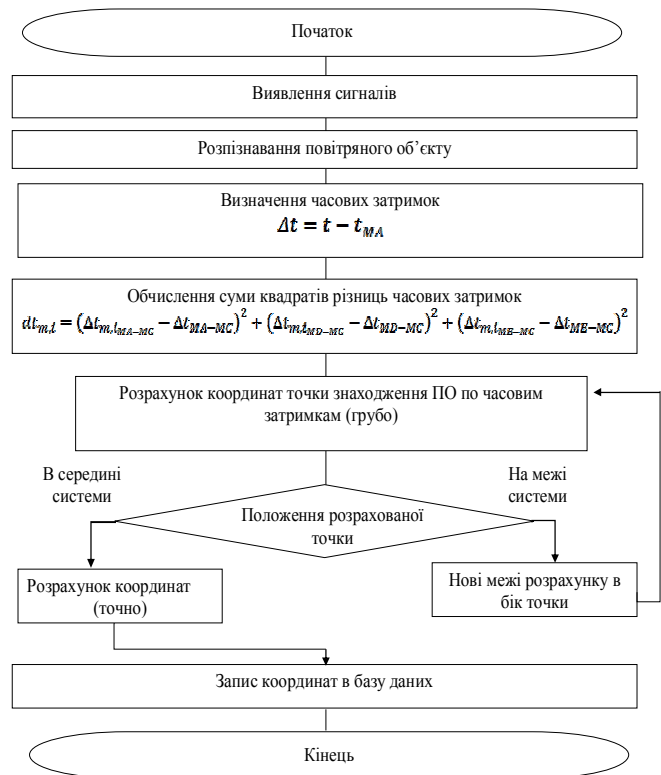


Рис. 7. Алгоритм розрахунку координат ПО

Реалізація різницево-далекомірною методу вимагає точної синхронізації часу у всіх пунктах системи [8].

На четвертому етапі проводиться розрахунок координат ПО з грубим кроком з метою визначення положення ПО відносно розташування приймачів системи. Положення розрахованої точки (місця знаходження ПО) в результаті грубого розрахунку знаходиться або всередині системи, або на краю системи. Тоді приймається рішення: при знаходженні всередині системи виконується розрахунок з дрібним кроком, якщо розрахована точка на краю - провести ітерацію в сторону знаходження точки.

На п'ятому етапі відбувається запис інформації в базу даних – координати записуються в базу даних з відповідними поточними моментами часу. Записані координати згодом можуть використовуватися для передбачення майбутніх координат.

Представлений алгоритм оцінки координат ПО передбачає пошук мінімуму розбіжностей розрахункових і експериментально отриманих взаємних затримок сигналів.

Розроблена модель процесу оцінки координат ПО по часових затримках показала працездатність запропонованого алгоритму і дозволила провести дослідження впливу шумової компоненти на точність визначення координат. Адитивний шум впливає на величину часових затримок, а, отже, на точність визначення координат ПО різницево-далекомірним методом. Для визначення координат з точністю не гірше 300 метрів середньоквадратичної похибки максимально допустиме відхилення виміряних часових затримок від ідеальних (теоретичних) має становити не більше 0.03 мкс.

Використання приймачів ADS-B для підвищення точності визначення координат повітряного об'єкта. Для визначення координат ПО яке не передає своїх координат можна використовувати технологію MLAT (Multilateration). В якості приймачів, для підвищення точності визначення координат ПО запропоновано використовувати приймачі ADS-B. Технологія MLAT використовується з уже існуючим обладнанням РЛС і не потребує додаткової бортової апаратури. Вона не тільки гарантує високу точність визначення місця розташування і траєкторії, яку можна порівняти з моноімпульсними вторинними оглядовими радіолокаторами, але і представляє такі нові характеристики, як більш висока точність, швидкість оновлення і 3D стеження. В основу роботи технології MLAT покладено відомий різницево-далекомірний метод визначення координат ПО. Точна прив'язка часу (до 50 нс) може здійснюватися за допомогою GPS приймачів.

На рис. 8 схематично зображено реалізацію різницево-далекомірного методу для визначення похибки місцезнаходження ПО відносно його реально розташування.

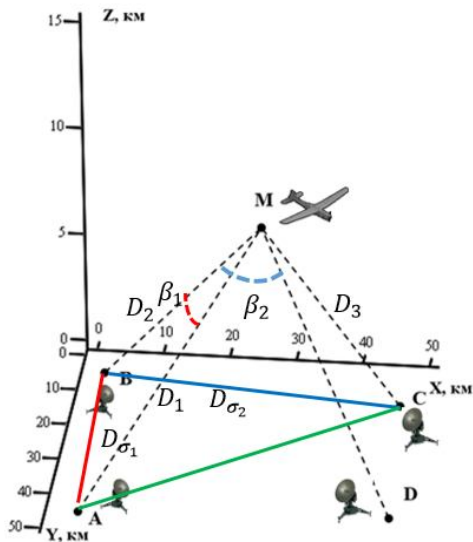


Рис. 8. Реалізація різницево-далекомірного методу

При реалізації різницево-далекомірного методу вимірюваними параметрами є часові затримки $\Delta\tau_1(c), \Delta\tau_2(c), \Delta\tau_3(c)$ поширення сигналу від ПО не менше ніж до трьох базових станцій системи, а параметрами, що розраховуються, – дальності від приймачів до місця знаходження ПО $D_3 = 3 \cdot 10^5 \times D_1 = 3 \cdot 10^5 \cdot \Delta\tau_1(км), D_2 = 3 \cdot 10^5 \cdot \Delta\tau_2(км), \times \Delta\tau_3(км)$ та базові кути β_1 та β_2 .

При відстанях між базовими станціями $D_{\sigma_1}(км), D_{\sigma_2}(км), D_{\sigma_3}(км)$ відомій похибці вимірювання часових інтервалів $\sigma_\tau(c)$, (рівної для кожного приймача в пунктів прийому), розрахованих дальностях D_1, D_2 та D_3 базові кути є такими:

$$\beta_1 = \arccos \left[\frac{\left((D_1)^2 + (D_2)^2 - (D_{\sigma_1})^2 \right)}{2D_1D_2} \right]; \quad (5)$$

$$\beta_2 = \arccos \left[\frac{\left((D_1)^2 + (D_2)^2 - (D_{\sigma_2})^2 \right)}{2D_1D_2} \right]. \quad (6)$$

Дальності від пункту прийому сигналу до ПО розраховуються таким чином:

$$D_i = \sqrt{(x_0 - x_M)^2 + (y_0 - y_M)^2 + (z_0 - z_M)^2}, \quad (7)$$

де x_0, y_0, z_0 – координати i -го приймача, x_M, y_M, z_M – координати ПО.

Похибка визначення положення ПО відносно його реального місце знаходження σ_n визначається як

$$\sigma_n = \frac{1,5 \cdot 10^5 \cdot \sigma_\tau \sqrt{\sin^2(0,5 \cdot \beta_1) + \sin^2(0,5 \cdot \beta_2)}}{\sin[0,5(\beta_1 - \beta_2)] + \sin(0,5 \cdot \beta_1) \cdot \sin(0,5 \cdot \beta_2)}. \quad (8)$$

Вихідні дані для розрахунків (рис. 9):

$\sigma_\tau = 0,07 \cdot 10^{-6}$ мкс - похибка вимірювання часових інтервалів для кожного приймача (зумовлена точність системи GPS); M (30; 30; 10) – координати ПО; A(5; 45; 0), B(5; 5; 0), C(50; 10; 0), D(50; 45; 0) – координати приймачів; $D_{\sigma_1} = 40км, D_{\sigma_2} = 45км$ – відстані між базовими станціями.

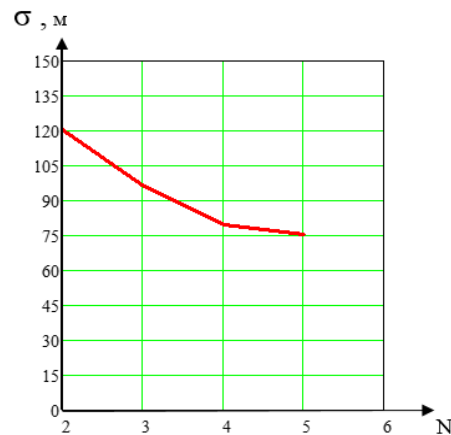


Рис. 9. Залежність похибки визначення положення ПО від кількості приймачів

Висновки і напрямки подальших досліджень

Результати розрахунків (рис. 9) засвідчують, що похибка вимірювання координат зменшується зі збільшенням кількості приймачів в системі. Разом з тим використання більш ніж чотирьох приймачів не доцільне.

Проведені розрахунки показали, що застосування технології MLAT та використання в системі приймачів ADS-B може зменшити похибку вимірювання координат практично до 75 метрів. Проте дані розрахунки проводились з урахування перебування ПО в середині системи та без врахування впливу шумів, атмосфери, та інших факторів, що можуть здійснювати вплив на точність визначення координат ПО. Крім того, велике значення при визначенні точності координат ПО має синхронізація приймачів на кожному пункті прийому.

Точність визначення координат ПО залежить від низки факторів [9-12]:

- тактико-технічні характеристики РЛС (ширина діаграми спрямованості, відношення сигнал-шум та ін.);
- погодні умови;
- рельєф місцевості;
- інструментальні помилки РЛС (неточність орієнтування антени, помилками оператора при візуальному зніманні азимута цілей;
- якісне проведення регулярного і своєчасного юстування РЛС;

- точна синхронізація приймачів системи;
- геометричне розташування ПО відносно приймачів системи.

Використання технології MLAT та приймачів системи ADS-B на позиціях радіотехнічних підрозділів дасть змогу зменшити допустиме відхилення вимірних часових затримок. Це зумовлено насамперед тим, що точність приймачів ADS-B визначається точністю визначення координат в системі GPS.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fewell M. P. Area of common overlap of three circles / M. P. Fewell // Maritime operations divisions defences science and technology organization. – 2006. – P. 1–30.
2. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск / В. Н. Тяпкин, А. Н. Фомин, Е. Н. Гарин [и др.]; под общ. ред. В.Н. Тяпкина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 536 с.
3. Маляренко А. С. Системи вторинної радіолокації для управління повітряним рухом та державного впізнання / А. С. Маляренко. – Х.: ХУПС, 2007. – 78 с.
4. Standards of USA "RTCA DO-260B. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B)". – Washington, 2009. – 185 p.
5. Лещенко С. П. Використання інформації ADS-B в інтересах підвищення якості ведення радіолокаційної розвідки повітряного простору / С. П. Лещенко, О. М. Колесник, С. А. Грицаєнко, С. І. Бурковський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХНУПС, 2017. – № 3(28). – С. 69–75.
6. Flightradar24 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: www.flightradar24.com.
7. Болотов А. Ю. Разработка алгоритмов разностно-дальномерной обработки сигналов управления воздушным движением / А. Ю. Болотов // Современные научные исследования и инновации. – Воронеж: ВГТУ, 2016. – № 4(60). – С. 85–95.
8. Федоров А. В. Метод синхронізації системи приймачів ADS-B при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки з використанням технології MLAT / А. В. Федоров, Г. В. Худов, Б. В. Бакуменко, К. А. Тахьян, С. М. Ковалевський // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава : ПНТУ, 2019. – Вип. 4 (56). – С. 9–12.
9. Коваленко А. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування / Коваленко А. А., Кучук Г. А. // Сучасні інформаційні системи. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 22–27. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
10. Вибір способу формування цифрового коду азимутального положення антени в оглядових РЛС "старого" парку / О. А. Малишев, М. Р. Арасланов, О. М. Піскун, Є. С. Чекіров // Системи озброєння і військова техніка. – 2018. – № 1(53). – С. 175–182.
11. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации / Я. Д. Ширман. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
12. Федоров А. В. Метод юстування радіолокаційної станції радіотехнічних військ з використанням технології автоматичного залежного спостереження / А. В. Федоров, Г. В. Худов, О. В. Сова // Системи управління, навігації та зв'язку. — Полтава : ПНТУ, 2019. — Вип. 2 (54). — С. 155–158.

Received (Надійшла) 18.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.11.2019

Evaluation of the possibilities of using MLAT technology and ADS-B receivers to increase the accuracy of determining the coordinates of air objects

A. Fedorov, H. Khudov, S. Kovalevskiy, F. Zots, K. Tahyan

Abstract. The subject of study is the possibilities of MLAT technologies and ADS-B receivers usage to increase the accuracy of determining the coordinates of air objects. **The aim** is to increase the accuracy of determining the coordinates of air objects through the MLAT technology and the ADS-B receiver system usage. **The purposes:** analysis of the variate-difference method, proposals for the implementation of multilateration technology using ADS-B receivers in the interests of radar troops, a brief analysis of the capabilities of ADS-B technology, analysis of the possibilities of using ADS-B receivers to improve the accuracy of determining the coordinates of an air object. The used **methods** are: radar methods, methods of the theory of reception and processing of signals, determining the coordinates of air objects. The following **results** are obtained. The factors affecting the accuracy of determining the coordinates of air objects are determined. The possibility of using the technology of automatic dependent observation and multilateration technology to improve the accuracy of determining the coordinates of air objects is established. The intervals of deviation of time delays are determined depending on the location of the air object relative to the receiver system to ensure that the positioning error will not exceed 300 m. The dependence of the determining the position error of an air object on the number of receivers is determined. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows. It was estimated that the advantages of using MLAT technology and the ADS-B receiver system to determine the coordinates of an air object is to reduce the positioning error of an air object. The use of MLAT technology and the ADS-B receiver system does not require significant changes to existing radar systems. In turn, the use of MLAT technology and the ADS-B receiver system is an additional source of information about the air situation. Further studies suggest the use of MLAT technology and the ADS-B receiver system at the positions of the radioelectronic units in the course of conducting radar control of the air situation.

Keywords: ADS-B, MLAT, algorithm, air environment, dependent surveillance, airspace control, coordinates, GPS.

Контроль космічного та повітряного простору

УДК 681.3

doi: 10.26906/SUNZ.2019.6.009

К. С. Васюта, Д. А. Чопенко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ У ВІДКРИТІЙ ЕКСПЕРТНІЙ СИСТЕМІ ПУНКТУ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИХ СИЛ

Анотація. У статті запропоновано в рамках використовуваного формально-логічного апарату структури цільових установок розробка моделі використання ресурсів у відкритій експертній системі пункту управління Повітряних Сил. Розглянутий порядок та основні правила використання множини ресурсів керованої системи. Визначено, що використання ресурсів керованої системи здійснюється на основі сукупності правил, які сформульовані в нормативних документах та які можна розділити на наступні групи: нормативні правила використання ресурсу, нормативні правила витрати та поповнення запасу впливів ресурсу і правила спільного використання ресурсів. Обґрунтовані та сформульовані на змістовному рівні основні гіпотези моделі ресурсів, які можуть бути використані при формалізації задач управління, що вирішуються на пункті управління Повітряних Сил. Сформульовані ресурсно-часові обмеження, яким повинен задовольняти варіант рішення, що синтезується. Напрямок подальших досліджень є розробка відповідного методу формалізації та маніпулювання знаннями про порядок і правила використання ресурсів.

Ключові слова: пункт управління, експертна система, ресурси, знання, формалізація, структура цільових установок.

Вступ

Постановка проблеми. У процесі синтезу можливих варіантів розподілу підлеглих засобів вогневого та інформаційного придушення й інформаційних засобів ПУ на пункті управління (ПУ) Повітряних Сил (ПС) необхідний облік в явному вигляді матеріально-енергетичного аспекту знань, який відображає знання про відповідні часові співвідношення і необхідні ресурси, що забезпечують виконання поставленого бойового завдання [1].

Формалізувати процес управління силами та засобами ПУ ПС у повному обсязі не представляється можливим [2, 3]. Тому під управлінням ПУ ПС будемо розуміти тільки процес, який пов'язаний з виробленням рішення та реалізацією розподілу сил та засобів ПУ у ході безпосередньої підготовки та ведення бойових дій.

Тому в рамках використовуваного формально-логічного апарату структури цільових установок (СЦУ) [4] необхідна розробка моделі використання ресурсів у відкритій експертній системі ПУ ПС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з основних понять при рішенні задач даного класу є поняття ресурсу, тобто того, що будемо розподіляти. У загальному випадку під ресурсами розуміються деякі матеріальні засоби надання цілеспрямованого впливу на об'єкти зовнішнього середовища або (та) отримання даних про них. Проте надалі у якості ресурсу ми будемо розглядати тільки засоби вогневого та інформаційного придушення та інформаційні засоби ПУ ПС, які можуть бути використані їх для надання впливу на повітряного противника та отримання даних.

Особливості управління ПУ ПС визначаються особливостями ведення бойових дій в сучасних

умовах [5]. Аналіз характеру бойових дій в локальних конфліктах останніх років показує, що у теперішній час є ряд особливостей [1, 6–7], які впливають на управління ПУ ПС взагалі.

Перша особливість полягає у тому, що бойові дії будуть виконуватися в умовах гострого дефіциту часу. Друга особливість – значна кількість інформації, яка надається командирі й на основі якої він повинен приймати рішення. Наступна особливість управління бойовими діями ПУ ПС полягає у тому, що прийняття якісного рішення, тобто рішення яке найбільше відповідає ситуації, що склалася, важке через невизначену інформації.

Нарешті, слід мати на увазі, що для вироблення рішення на управління ПУ ПС командир повинен, при наймі, хоча б один варіант дій підлеглих сил та засобів, що визначає розподіл їх по повітряним цілям. Проте в сучасних умовах кількість можливих варіантів дій значно збільшилося за рахунок можливості, що з'явилася, вибору різних систем вражаючих засобів, використання засобів невражаючих дій та інше. Це призводить до того, що вироблення більш обґрунтованого рішення необхідно синтезувати множину варіантів розподілу ресурсів ПУ ПС в конкретній ситуації з урахуванням заданих обмежень на кількість ресурсів, що використовуються, та на час виконання бойової задачі [8].

Мета статті – розробка моделі використання ресурсів у відкритій експертній системі пункту управління Повітряних Сил.

Виклад основного матеріалу

Модель ресурсів керованої системи. Усі керуючі впливи на повітряні об'єкти (повітряного противника) здійснюються силами та засобами ПС за допомогою використання множини ресурсів. У зага-

льному випадку система може володіти різними типами ресурсів. Так, наприклад, для ПУ ПС в якості ресурсів можуть розглядатися підлеглі з'єднання, частини й підрозділи родів військ ПС.

Можливість використання R_i ресурсу ПУ ПС (i – тип ресурсу), як засобу надання цілеспрямованого впливу на ПО, можна відобразити за допомогою наступних його характеристик:

- запас ресурсу в момент часу t – $Z(R_i, t)$;
- запас впливу ресурсу в момент часу t – $3(R_i, t)$.

При цьому будемо розуміти під запасом ресурсу кількість одиниць ресурсу даного типу, а під запасом впливів – кількість засобів реалізації впливів, за допомогою яких здійснюється безпосередній вплив на об'єкти зовнішнього середовища. Тому величина запасу ресурсу характеризує потенційну можливість його використання, а величина запасу впливу – реальну.

Стосовно до задачі, яка вирішується, в якості ресурсу може виступати збр. У цьому випадку запас ресурсу можна визначити як кількість збр у ПвК, а запас впливу ресурсу даного типу як сумарна кількість вогневих каналів.

Математична модель деякої системи, зокрема модель ресурсів, повинна включати в себе гіпотези, обмеження і припущення [9]. Для того, щоб сформулювати основні гіпотези, обмеження і припущення моделі ресурсів в першу чергу проаналізуємо порядок і правила використання ресурсів, зумовлені специфікою управління засобами вогневого та інформаційного придушення і інформаційними засобами ПУ ПС.

Порядок та основні правила використання множини ресурсів системи. Виходячи з аналізу особливостей даної предметної області, порядок використання ресурсу конкретного типу можна представити у вигляді графа станів, який наведений на рис. 1 [10-12].

На графі введені такі стани:

A_0 – ресурс R_i не готовий в момент часу t до використання внаслідок відсутності запасу впливів $3(R_i, t) = 0$ або знаходиться в граничному (в сенсі можливості функціонування) стані;

A_1 – ресурс знаходиться в стані поповнення запасу впливів;

A_2 – ресурс володіє запасом впливів $3(R_i, t) > 0$, але не приведений в готовність до впливу на об'єкти зовнішнього середовища;

A_3 – ресурс володіє запасом впливів $3(R_i, t) > 0$, готовий до надання впливів на об'єкти зовнішнього середовища, але не використовується;

A_4 – ресурс залучений частиною запасу впливу $3^u(R_i, t)$ для надання впливів на об'єкти зовнішнього середовища, $3(R_i, t) - 3^u(R_i, t) > 0$;

A_5 – ресурс залучений для надання впливів на об'єкти зовнішнього середовища всім запасом впливів $3^u(R_i, t) = 3(R_i, t)$.

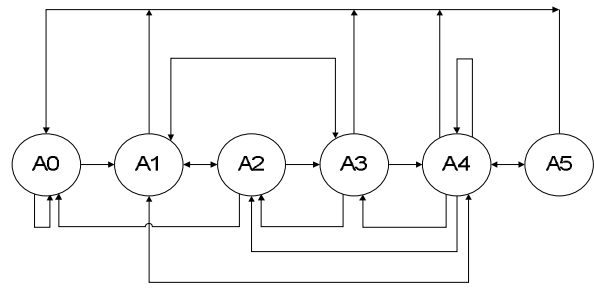


Рис. 1. Граф станів ресурсу

Перехід $A_0 \rightarrow A_1$ відповідає початку поповнення запасу впливів ресурсу після його повної витрати або процесу відновлення працездатності ресурсу. Перехід в стан поповнення запасу впливів можливий й із станів A_2, A_3, A_4 (переходи $A_2 \rightarrow A_1, A_3 \rightarrow A_1, A_4 \rightarrow A_1$). У цьому випадку повернення здійснюється в стан, в якому здійснюється накопичення запасу впливів ресурсу ($A_1 \rightarrow A_2, A_1 \rightarrow A_3, A_1 \rightarrow A_4$).

Слід відзначити той факт, що в загальному випадку всі часові характеристики, що визначають час перебування ресурсу в якомусь стані або час переходу його з одного стану в інший є обмеженими випадковими величинами. При цьому в більшості випадків визначити закони розподілу цих випадкових величин практично неможливо. Однак в теорії ймовірності доведено, що незалежно від щільності розподілу випадкової величини завжди можна визначити інтервал, в який дана випадкова величина потрапляє із заданою ймовірністю (теорема Чебишева) [13].

Тому в подальшому усі випадкові величини, що визначають часові характеристики ресурсу (в тому числі й час його використання) ми будемо розглядати як нестохастичні випадкові величини, які задані за допомогою інтервалу можливих значень. У загальному випадку такі випадкові величини є безперервними, проте припустимо, що ми зробили їх дискретизацію, з урахуванням заданої точності рішення задачі. Тому в подальшому будемо вважати, що вони можуть приймати тільки обмежений набір значень із заданого інтервалу.

Стан A_1 характеризується інтервалом часу $T_{ПЗВ}^*$, протягом якого здійснюється поповнення запасу впливів ресурсу, та інтенсивністю поповнення $I^П(R_i, T_{ПЗВ}^*)$. У загальному випадку інтенсивність поповнення запасу впливів ресурсу i -го типу на часовому інтервалі $T_{ПЗВ}^* = [t_{ПЗВ}^1, t_{ПЗВ}^2]$ визначається таким співвідношенням:

$$I^П(R_i, T_{ПЗВ}^*) = \frac{\sum_{v=1}^V \sum_{t=t_{ПЗВ}^1}^{t_{ПЗВ}^2} H_{П}(R_i, t)_v}{t_{ПЗВ}^2 - t_{ПЗВ}^1}, \quad (1)$$

де $H_{П}(R_i, t)_v$ – v -та норма поповнення запасу впливів i -го ресурсу в момент часу t ;

V – кількість різних норм поповнення запасу впливів R_i ресурсу.

Після поповнення запасу впливів зі стану $A1$ ресурс переходить в стан $A2$.

Перевід ресурсу в готовність до використання $A2 \rightarrow A3$ здійснюється за час $t_{ПРГ}(R_i)$. Можливий й зворотній перехід $A3 \rightarrow A2$ при відсутності необхідності у використанні ресурсу.

Перехід $A3 \rightarrow A4$ здійснюється залученням ресурсу для надання впливів на об'єкти зовнішнього середовища і характеризується часом переводу ресурсу в стан надання впливів $t_{ПРВ}(R_i)$.

Час $t_{ПРГ}(R_i)$ та $t_{ПРВ}(R_i)$ визначаються тактико-технічними характеристиками використовуваного ресурсу.

Стан $A4$ характеризується інтервалом часу T_{P3B}^* протягом якого використовується даний ресурс та інтенсивністю витрати запасу впливів $I^P(R_i, T_{P3B}^*)$ даного ресурсу.

У загальному випадку кожен з ресурсів системи може залучатися для надання впливів на кілька об'єктів зовнішнього середовища одночасно. Тому інтенсивність витрати запасу впливів $I^P(R_i, T_{P3B}^*)$ ресурсу i -го типу на часовому інтервалі $T_{P3B}^* = [t_{P3B}^1, t_{P3B}^2]$ визначається наступним співвідношенням:

$$I^P(R_i, T_{P3B}^*) = \frac{\sum_{q=1}^Q \sum_{t=t_{P3B}^1}^{t_{P3B}^2} H_P(R_i, t)_q}{t_{P3B}^2 - t_{P3B}^1}, \quad (2)$$

де $H_P(R_i, t)_q$ – q -та норма витрати запасу впливів i -го ресурсу в момент часу t ;

Q – кількість різних норм витрати запасу впливів R_i ресурсу.

Час використання ресурсу носить явно виражену функціональну залежність від набору вихідних параметрів (характеристик цілі, тактико-технічних характеристик і географічного розташування ресурсу і т.п.).

У стані $A4$ можливий перехід $A4 \rightarrow A4$, який визначає нарощування витрати запасу впливів ресурсу в рамках його запасу – послідовне залучення ресурсу для надання впливів на об'єкти зовнішнього середовища. При досягненні граничного значення $3''(R_i, t) = 3(R_i, t)$ (залучення всього запасу впливів ресурсу) здійснюється перехід в стан $A5$. Після закінчення впливів в стані $A4$ та наявності деякого залишкового запасу впливів можливий перехід в стан $A3$ або $A2$ (в залежності від обстановки, що складається).

Із стану $A5$ можливий перехід в стан $A4$ (при наявності невикористаного з яких-небудь причин запасу впливів) або в стан $A0$ (після закінчення

впливу). Перехід в $A0$ можливий з будь-якого стану у разі припинення функціонування ресурсу.

Використання ресурсів здійснюється на основі правил, які сформульовані в нормативних документах. Всі ці правила можна розділити на такі дві групи:

1. Нормативні правила використання R_i ресурсу – $\overline{Ni}(R_i)$.

Дані правила характеризують можливість використання даного типу ресурсу в конкретній ситуації, тобто фактично вони визначають чи можна призначити ресурс на виконання роботи за певних початкових умов. Ці правила формуються на основі нормативних документів і директив, які визначають умови використання того чи іншого типу ресурсу.

2. Нормативні правила витрати $\overline{Np}(R_i)$ та поповнення $\overline{Nn}(R_i)$ запасу впливів R_i ресурсу.

Ці правила визначають порядок використання відповідних норм. При цьому інтенсивність витрати або поповнення запасу впливів ресурсу певного типу на кожному одиничному часовому інтервалі є величина постійна, так як вона визначається тільки нормами витрати або поповнення запасу впливів ресурсу, які в свою чергу задаються нормативними документами у вигляді констант (вирази (1)–(2)).

Однак наведених вище правил недостатньо для повного опису ресурсів системи, так як деякі з ресурсів можуть використовуватися у взаємодії з іншими видами ресурсів [9]. Тому необхідно ще визначити правила спільного використання ресурсів \overline{Pr}^c .

Правила спільного використання ресурсів визначають можливість одночасного використання ресурсів різного типу, норми витрати запасу впливів ресурсів при їх взаємодії, а також пріоритет спільного використання ресурсів. Зазначені правила будуються на основі нормативних документів, а також розпоряджень командирів і начальників, що визначають способи взаємодії підлеглих з'єднань, частин і підрозділів родів військ.

Основні гіпотези моделі ресурсів. Обґрунтовані та сформульовані на змістовному рівні такі основні гіпотези моделі ресурсів, які можуть бути використані при формалізації задач управління, що вирішуються на ПУ ПС.

1. Усі цілеспрямовані впливи на ПО здійснюються за допомогою використання множини ресурсів;

2. Ресурси мають засоби надання впливів на об'єкти зовнішнього середовища;

3. Ресурси використовуються на підставі певних нормативних правил $\overline{Ni}(R_i)$;

4. Керована система в кожен момент часу t має певний запас кожного з ресурсів $\overline{Z}(R_i, t)$;

5. Кожен з ресурсів керованої системи має певний запас впливів $\overline{Z}(R_i, t)$;

6. Ресурси мають нормативні правила витрати $\overline{Np}(R_i)$ та поповнення $\overline{Nn}(R_i)$ запасу впливів;

7. Ресурси можуть витрачати та поповнювати запас впливів за певний проміжок часу, який визначається технічними можливостями засобів реалізації впливів;

8. Ресурси системи характеризуються просторовими параметрами – географічним положенням, дальністю реалізації впливів і т.п.;

9. Ресурси можуть використовуватися послідовно або спільно у відповідності до правил спільного використання \overline{Pr}^c .

Таким чином, при формалізації задач управління, що вирішуються на пункті управління Повітряних Сил з використанням апарату формалізації структури цільових установок [3] множина нелогічних аксіом, які характеризують особливості предметної області, необхідно доповнити сукупністю аксіом, які описують розглянуту модель ресурсів. Дані нелогічні аксіоми можуть бути представлені у такому вигляді:

$$\forall R_i \forall t (\exists Z(R_i, t) > 0) \{ [3(R_i, t) > 0] \wedge G(R_i, t) \} \Rightarrow M \uparrow D(R_i, \overline{O}_j, t), \quad (3)$$

$$\forall R_i \forall T_{P3B}^* \left\{ \left(t_{P3B}^2 - t_{P3B}^1 > 0 \right) \wedge D(R_i, \overline{O}_j, t_{P3B}^1) \right\} \Rightarrow \left\{ \left[\frac{3(R_i, t_{P3B}^2) - 3(R_i, t_{P3B}^1)}{t_{P3B}^2 - t_{P3B}^1} = I^P(R_i, T_{P3B}^*) \right] \wedge (I^P(R_i, T_{P3B}^*) > 0) \right\}, \quad (4)$$

$$\forall R_i \forall T_{ПЗВ}^* \left\{ \left(t_{ПЗВ}^2 - t_{ПЗВ}^1 > 0 \right) \wedge \neg D(R_i, \overline{O}_j, t_{ПЗВ}^1) \right\} \Rightarrow \left\{ \left[\frac{3(R_i, t_{ПЗВ}^2) - 3(R_i, t_{ПЗВ}^1)}{t_{ПЗВ}^2 - t_{ПЗВ}^1} = I^{II}(R_i, T_{ПЗВ}^*) \right] \wedge (I^{II}(R_i, T_{ПЗВ}^*) \geq 0) \right\}, \quad (5)$$

$$\forall i \forall t [\exists R_i] \left\{ Ni(R_i)_e \equiv (\exists \overline{O}_a [\forall O_k \in \overline{O}_a (Pi_j \equiv Yi(t)_m)] \Rightarrow R_i) \right\}, \quad (6)$$

$$\forall i \forall t [\exists R_i] \left\{ Np(R_i)_e \equiv (\exists \overline{O}_b [\forall O_p \in \overline{O}_b (Pp_j \equiv Yp(t)_m)] \Rightarrow Hp(R_i, t)_q) \right\}, \quad (7)$$

$$\forall i \forall t [\exists R_i] \left\{ Nn(R_i)_e \equiv (\exists \overline{O}_c [\forall O_n \in \overline{O}_c (Pn_j \equiv Yn(t)_m)] \Rightarrow Hn(R_i, t)_v) \right\}, \quad (8)$$

$$\forall i \forall t [\exists R_i] \left\{ Pr_u^c \equiv \bigcup_{i \ m} \left(\left[Ni^c(R_i)_s \right], \left[Np^c(R_i)_e \right], \left[Hp^c(R_i, t)_q \right] \right) / \overline{Yp} \right\}, \quad (9)$$

$$\forall R_i \forall t \exists Kx \exists Ky \exists Kz \{ [\exists Kx(R_i, t) \geq 0] \wedge [\exists Ky(R_i, t) \geq 0] \wedge [\exists Kz(R_i, t) \geq 0] \}, \quad (10)$$

$$\forall R_i \forall t \exists D_1 \exists D_2 \{ [D_1(R_i) \leq D_2(R_i)] \wedge M \uparrow (R_i, \overline{O}_j, t)_{D_1} \wedge \neg M \uparrow (R_i, \overline{O}_j, t)_{D_2} \}, \quad (11)$$

де $G(R_i, t)$ – предикат, що позначає стан готовності i -го ресурсу до надання впливів в момент часу t ;

$D(R_i, \overline{O}_j, t)$ – предикат, що позначає деяку дію, вироблену за допомогою впливів R_i ресурсу на множині \overline{O}_j об'єктів зовнішнього середовища в момент часу t ;

$M \uparrow$ – предикат, що позначає можливість виникнення деякої події у майбутньому;

$\overline{O}_a, \overline{O}_b, \overline{O}_c$ – множини об'єктів аналізу посилки;

$O_k, Pi_j, Yi(t)_m$ – відповідно об'єкт аналізу, ознака, що характеризує деяку властивість об'єкта та його значення, що визначає істинність посилки для нормативних правил використання ресурсу

$O_p, Pp_j, Yp(t)_m, O_n, Pn_j, Yn(t)_m$ – об'єкт аналізу, ознака та його значення відповідно для нормати-

вних правил витрати й поповнення запасу впливів ресурсу;

Pr_u^c – u -е правило спільного використання ресурсів;

$Ni^c(R_i)_s$ – s -те нормативне правило спільного використання i -го ресурсу;

$Np^c(R_i)_e$ – e -те нормативне правило витрачання запасу впливів i -го ресурсу при спільному використанні ресурсів;

$Hp^c(R_i, t)_q$ – q -та норма спільного використання запасу впливів i -го ресурсу;

\overline{Yp} – множина умов застосування нормативних правил при їх об'єднанні в склад правил спільного використання ресурсів;

$Kx(R_i, t), Ky(R_i, t), Kz(R_i, t)$ – координати розташування R_i ресурсу в просторі в момент часу t ;

$D(R_i)$ – дальність надання впливів ресурсу i -го типу.

Аксіоми визначають наступне:

(2)–(5) можливість надання впливів, використання та поповнення запасу впливів ресурсу;

(6) – порядок формування нормативних правил використання ресурсу;

(7), (8) – порядок формування нормативних правил витрати і поповнення запасу впливів ресурсу;

(9) – порядок формування правил спільного використання ресурсів при їх взаємодії;

(10), (11) – описують просторові характеристики ресурсу.

Використання СЦУ для формалізації задач управління передбачає, що всі синтезовані варіанти досягнення множини цільових станів повинні задовольняти деякої сукупності ресурсно-часових обмежень. Тому при формалізації знань про правила використання ресурсів необхідно врахувати ці обмеження.

Ресурсно-часові обмеження, яким повинен задовольняти варіант рішення, що синтезується. Сформульовані наступні загальні ресурсно-часові вимоги (обмеження) до варіантів рішень, що формуються.

1. Час досягнення безлічі цільових станів Час досягнення множини цільових станів $t_{ДЦ}$ не повинен перевищувати деякого наперед заданого значення $t_{ТР}$

$$t_{ДЦ} \leq t_{ТР}. \quad (12)$$

2. На будь-якому часовому інтервалі

$$T^* = [t^1, t^2], \quad (t^1 \leq t^2 \leq t_{ДЦ})$$

протягом якого інтенсивність витрати запасу впливів розглянутого ресурсу залишається незмінною повинно виконуватися наступна нерівність:

$$\forall R_i \left\{ \left(I^P(R_i, T^*) \times (t^2 - t^1) \right) \leq \min_{t=t^1}^{t^2} Z(R_i, t) \right\}. \quad (13)$$

3. Загальна витрата запасу впливів кожного типу ресурсу в процесі досягнення множини цільових станів не повинна перевищувати величини $Z(R_i)$:

$$\forall R_i \left\{ \sum_{t=0}^{t_{ДЦ}} \sum_{q=1}^Q H_p(R_i, t)_q \leq Z(R_i) \right\}. \quad (14)$$

4. Одночасно роботи, що виконуються, не є взаємовиключними.

Аналіз завдань, що вирішуються на ПУ ПС з управління підлеглими з'єднаннями, частинами та підрозділами родів військ показує, що вищенаведені вимоги повинні бути доповнені наступними.

5. Нерозривність роботи, тобто неможливість перервати хід її виконання до повного закінчення. Переривання роботи означає неможливість досягнення якогось стану, що є закінченням даної роботи.

А це, в свою чергу, веде до недосягнення поставленої мети управління.

6. Обмеження по терміну використання ресурсу. До моменту виконання роботи запас впливу ресурсу може бути рівним нулю або виявитися недостатнім для виконання поставленої задачі з заданою кількістю в зазначені терміни.

Для відновлення запасу впливів R_i ресурсу необхідний деякий час $t_{восм}(R_i)$, який дає можливість довести запас ресурсу відповідного типу до рівня, що забезпечує виконання поставленого завдання. При цьому інтенсивність поповнення запасу впливів $I^{II}(R_i, T_{ПЗВ}^*)$ ресурсу i -го типу на часовому інтервалі $T_{ПЗВ}^* = [t_{ПЗВ}^1, t_{ПЗВ}^2]$ визначається виразом (1).

7. Зменшення ресурсу в часі.

Запаси ресурсу вважаються постійними. Але специфіка даної предметної області не дозволяє прийняти таке припущення. Так, при відображенні масованого удару повітряного противника ефективність застосування сил і засобів ПУ ПС буде зменшуватися як за рахунок їх можливого нераціонального використання, так і за рахунок безповоротних втрат особового складу і бойової техніки на всіх етапах ведення бойових дій. Таким чином, запас впливів ресурсу конкретного типу є незростаючою функцією часу. Так як оцінити всі фактори, що впливають на зменшення ресурсу, неможливо, то для досягнення поставлених цілей потрібно вживати усі заходи для зменшення спадання ресурсу у часі. І крім того необхідно вимагати щоб різниця між початковим та поточним значеннями запасу впливів R_i ресурсу для всього проміжку часу виконання роботи перевищувала б деякий встановлений мінімальний поріг $\lambda(R_i)$:

$$\max_{t=0}^{t_{ДЦ}} Z(R_i, t) - Z(R_i) \geq \lambda(R_i). \quad (15)$$

8. Можливість перепризначення ресурсу в ході виконання бойового завдання.

У процесі досягнення цільових станів часто існує можливість перерозподілу ресурсу з однієї роботи на іншу, а також призначення кілька ресурсів для виконання однієї роботи.

Використання апарату формалізації СЦУ для формалізації задач управління, що вирішуються на ПУ ПС, передбачає необхідність здійснення контролю коректності всіх її структурних елементів на етапах розробки та поповнення бази знань відкритої експертної системи [2-3, 8]. Знання про правила використання ресурсів і запасу їх впливів є одним з основних структурних елементів використовуваного апарату формалізації, і тому необхідна розробка відповідної процедури контролю їх коректності.

Висновки

Таким чином, використання СЦУ в якості апарату формалізації задач управління, що вирішують-

ся на ПУ ПС, передбачає, що особливості предметної області, зокрема, знання про ресурсах, описуються за допомогою деякої логічної моделі. Однак жорсткі обмеження, що пред'являються до часу вироблення рішення на ПУ ПС неможливо безпосередньо використовувати систему нелогічних аксіом для опису знань про ресурси. Проведений аналіз показує на необхідність в розробки методу формалізації, який би дозволив сформулювати структуру знань, що забезпечує їх придатність для вирішення завдань управління ресурсами ПУ ПС в реальному масштабі часу.

Використання ресурсів керованої системи здійснюється на основі сукупності правил, які сформульовані в нормативних документах (бойових стату-

тах, директивах і розпорядженнях командирів і т.п.). Дані правила можна розділити на наступні групи: нормативні правила використання ресурсу, нормативні правила витрати і поповнення запасу впливів ресурсу і правила спільного використання ресурсів.

Обґрунтовані та сформульовані на змістовному рівні такі основні гіпотези моделі ресурсів, які можуть бути використані при формалізації задач управління, що вирішуються на ПУ ПС.

Сформульовані ресурсно-часові обмеження, яким повинен задовольняти варіант рішення, що синтезується.

Напрямок подальших досліджень є розробка методу формалізації та маніпулювання знаннями про порядок і правила використання ресурсів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Смірнов О. О. Аналіз бойового застосування авіації в локальних війнах і збройних конфліктах другої половини ХХ – поч. ХХІ ст. / О. О. Смірнов, О. В. Білов // Наука і техніка ПС ЗСУ. – 2010. – № 1(3). – С. 67-75.
2. Павленко М. А. Метод формалізації процесу вирішення задачі визначення напрямку удару засобів повітряного нападу на оперативному напрямку / М. А. Павленко, В. О. Корнев, В. Є. Герасимов // Системи озброєння та військова техніка. – 2008. – № 1(13). – С. 64-69.
3. Тимочко А. И. Совершенствование средств формализации задач по управлению динамическими объектами / А. И. Тимочко // Системи обробки інформації. – 2010. – № 8. – С. 90-93.
4. Раковский Х. В. Задача формализации процессов управления боевой подготовкой / Х. В. Раковский, К. А. Метешкин, М. А. Павленко // Системи обробки інформації. – 2008. – № 2(69). – С. 162-165.
5. Ткаченко М.Д. Послідовність та зміст роботи командира і штабу з'єднання щодо організації маневреної оборони / М. Д. Ткаченко, М. А. Павленко // Збірник наукових праць ХУ ПС. – 2008. – № 2(17) – С. 29-32.
6. Радецький В. Г. Уроки і висновки бойових дій в Югославії / В. Г. Радецький // Народна армія. – 18.07.2000 р.
7. Свиридов А. Некоторые особенности операции „Свобода Ирака” / А. Свиридов // ЗВО. – 2003. – №4. – С. 2-7.
8. Павленко М. А. Проблеми виконання статистичного аналізу баз знань інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень / М. А. Павленко, С. В. Осієвський // Новітні технології – для захисту повітряного простору : XV міжнар. наук. конф., 10-11 квіт. 2019 р. : тези допов. – Харків, 2019. – С. 290-291.
9. Маценко В.Г. Математичне моделювання: навчальний посібник / В.Г. Маценко. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2014.–519 с.
10. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
11. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускну здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
12. Нікольський Ю. В., Пасічник В., Щербина Ю. М. Дискретна математика. – Львів: «Магнолія-2006», 2009. – 432 с.
13. Жалдак М. І. Теорія ймовірностей і математична статистика / М. І. Жалдак, Н. М. Кузьміна, Г. О. Михалін. – Київ : НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2015. – 706 с.

Received (Надійшла) 18.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.11.2019

Development of a model of use of resources in an open experts system of air control point

K. Vasiuta, D. Chophenko

Abstract. It is established that the use of the structure of target installations as an apparatus for formalizing control tasks solved at the control point of the Air Force provides that the features of the subject area, in particular, knowledge about resources, are described using some logical model. The article proposes, within the framework of the formal-logical apparatus of the structure of target installations, the development of a model for the use of resources in an open expert system of an Air Force control center. It is established that the mathematical model of some system, in particular, the resource model, must include hypotheses, limitations, and assumptions. In order to formulate the main hypotheses, limitations and assumptions of the resource model, the order and rules of resource use are analyzed. The order and basic rules for using multiple resources of a managed system are considered. It is determined that the use of resources of a managed system is carried out on the basis of a set of rules formulated in regulatory documents and which can be divided into the following groups: regulatory rules for the use of a resource, regulatory rules for consumption and replenishment of the effects of a resource, and rules for sharing resources. The main hypotheses of the resource model are substantiated and formulated at a substantive level, which can be used to formalize the control tasks to be solved at the control point of the Air Force. A lot of illogical axioms that characterize the features of the subject area, a set of axioms that describe the considered resource model are supplemented. Resource-time restrictions are formulated, which must be satisfied by the solution that is synthesized. The direction of further research is the development of an appropriate method of formalizing and manipulating knowledge about the procedure and rules for using resources.

Keywords: control point, expert system, resources, knowledge, formalization and manipulation of knowledge, structure of target settings.

А. В. Колесник¹, І. В. Захарченко², П. Г. Берднік³

¹ Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

² Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

³ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ СИТУАЦІЇ ПРИ ВІДМОВІ ДВИГУНА НА ПОВІТРЯНОМУ СУДНІ В ПОЛЬОТІ

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси розвитку ситуації при відмові двигуна на повітряному судні в польоті. **Метою** є побудова моделі можливого подальшого розвитку ситуації у випадку відмови двигуна на повітряному судні в польоті. **Завдання:** статистичний аналіз авіаційних подій, що сталися з цивільними повітряними суднами України, причиною яких стала відмова двигуна в польоті, аналіз необхідності дослідження дій авіаційних спеціалістів в особливих випадках з точки зору прийняття ними своєчасних правильних рішень в умовах зростаючого психоемоційного навантаження. Використовуваними **методами** є: методи аналізу і синтезу складних інформаційних систем, методи імітаційно-статистичного моделювання. Отримані такі **результати**. Встановлено, що кількість авіаційних подій, пов'язаних з відмовою двигуна не має тенденції до зниження. Встановлено, що додаткове нервово-емоційне навантаження стає на заваді виконання пілотом та авіадиспетчером їх основних професійних функцій. Побудована модель можливого розвитку ситуації при виникненні особливого випадку в польоті - відмові двигуна на повітряному судні для її подальшого використання при практичній підготовці авіадиспетчерів до дій в особливих випадках. **Висновки.** Напрямок подальших досліджень є розробка та побудова системи підтримки прийняття рішень для удосконалення технології роботи авіадиспетчера управління повітряним рухом

Ключові слова: відмова двигуна, особливі випадки, зліт, посадка, пілот, авіадиспетчер.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Досягнення ефективності авіаційних перевезень можливо лише при забезпеченні високого рівня безпеки польотів. В наш час дуже гостро постає проблема забезпечення безпеки польотів в особливих випадках, причинами яких є відмови авіаційної техніки. В значній мірі цьому сприяє експлуатація літальних апаратів, двигунів та комплектувальних виробів, що мають подовжений ресурс або тих, знаходяться на граничній межі термінів експлуатації. Крім того, важливим фактором також є орнітологічна обстановка в районі аеродрому.

При виникненні особливого випадку дії авіадиспетчера можуть відрізнятись від встановленого алгоритму роботи. При цьому виникає необхідність виконувати нестандартні дії, проявляти самостійність та ініціативу в умовах зростання психоемоційного навантаження.

При виникненні такого особливого випадку, такого як відмова двигуна (двигунів) на повітряному судні (ПС) під час виконання польоту для прийняття своєчасних правильних рішень пілот і авіадиспетчер повинні володіти належним рівнем спеціальних знань та практичних навиків управління. Професіоналізм диспетчера, достовірність та своєчасність наданої ним інформації в значній мірі можуть визначити наслідок такої ситуації.

Виникає потреба розробки програмного продукту, який би дозволив підвищити рівень безпеки польотів і ефективності роботи диспетчерів щодо їх дій при виникненні ОВП (особливий випадок в польоті), такого як, відмова двигуна на ПС (повітряне судно). На початковому етапі вирішення даного завдання необхідно здійснити моделювання можли-

вого розвитку ситуації при виникненні особливого випадку в польоті.

Мета статті – побудова моделі можливого подальшого розвитку ситуації у випадку відмови двигуна на повітряному судні в польоті

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення літературних джерел показало, що аналіз дій авіадиспетчера в нестандартних ситуаціях, пов'язаних з ОВП – відмова двигуна на ПС в польоті є в працях деяких авторів (Ю.Сікірда, С. Мельниченко, Т.Шмельова та ін). Але вони мають лише інформаційний характер і не вказують шляхи практичного використання матеріалів в навчальному та робочому процесах.

Також існує ряд наукових робіт, присвячених підготовці пілотів щодо їх дій в тому чи іншому ОВП. Наприклад в роботі [1] досліджено рух багатомоторного ПС з неповною тягою в результаті відмови одного чи більше двигунів, а також розраховано ймовірнісні характеристики польоту літака з двигуном, що відмовив. Однак більша частина роботи присвячена аналізу дій та рекомендаціям екіпажу та пілоту при виникненні відмови двигуна на ПС. Питання, присвячені проблемам, які виникають в авіадиспетчерів в таких ситуаціях не розглядаються. Інформації та літератури стосовно рекомендацій диспетчеру щодо його дій при виникненні відмови двигуна на ПС в польоті недостатньо, тому доцільно розглянути й більш детально вивчити процес роботи диспетчерів у таких випадках.

При написанні даної статті корисною була інформація з таких основних джерел статистичної інформації як [2], сайт Aviation Safety Network [3] (база даних з авіаційної безпеки: статистичні дані за різними типами ПС починаючи з 1943 року), сайт European Aviation Safety Agency (ведеться збір да-

них, дослідження по БП в Європі та світі) [4], ICAO Accident Indent Data Reporting system (База даних Міжнародної організації цивільної авіації); Сайт Airdisaster.com (незалежне Інтернет видання: дані по авіаційним подіям, деталізована статистика по рокам, регіонам, авіакомпаніям, типам ПС) [5], База даних NTSB [6] (детальний статистичний аналіз авіаційних подій, що сталися по причині відмови двигуна на ПС).

Основна частина

Статистичний аналіз авіаційних подій показує, що відмова авіаційного двигуна займає значне місце серед інших причин авіаційних подій (7,5%) [6].

В наш час існує достатньо велика кількість робіт (Люлька А.М., Кузнецов Н.Д., Мікулін А.А.,

Ізотов С.П., Климов В.Я. та ін.), в яких розглянуто причини відмови двигунів, а також, насамперед, поведіння при цьому диспетчера й екіпажа на етапах злету та посадки. Ці два етапи польоту вважаються найбільш критичними в авіації, що пов'язано з тим, що вони виконуються поблизу землі й на малих швидкостях, коли ефективність аеродинамічних органів управління і несучих поверхонь мала. Отже резерву часу та простору для виправлення навіть незначних помилок просто немає. Однак не менш важливим етапом польоту є горизонтальний політ, під час якого також мають місце катастрофічні ситуації.

На основі статистики відмов авіаційних двигунів [3] на різних етапах польоту за останнє десятиліття побудовано діаграму (рис. 1).

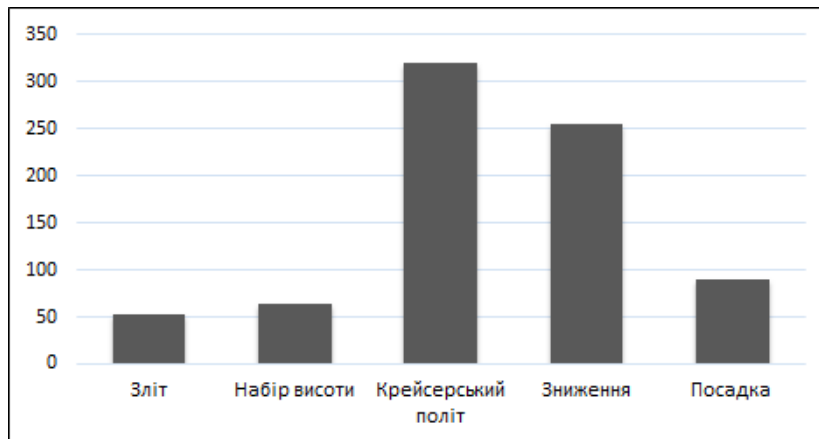


Рис. 1. Розподіл кількості випадків відмов двигунів за етапами польоту ПС

З наведеної діаграми видно, що етап горизонтального польоту (крейсерський політ) є не менш важливим етапом при аналізі випадків відмов двигуна.

Далі наведено аналіз стану безпеки польотів за результатами розслідування подій і інцидентів за останні роки, що сталися з цивільними повітряними суднами України, які внесені до Державного реєстру цивільних ПС.

В табл. 1 наведено відомості щодо кількості відмов двигунів, що мали місце з початку 2016 року по перше півріччя 2019 року з повітряними суднами України [7-10].

Таблиця 1 – Розподіл кількості відмов двигунів за роками

Роки	2016	2017	2018	1 пів. 2019
Кількість відмов двигуна	3	9	7	7

Серед видів відмов, що траплялись з авіаційними двигунами слід зазначити наступні: повна відмова двигуна, падіння потужності, самовільне вимкнення, зниження тиску масла в двигуні, пошкодження двигуна внаслідок попадання птахів, перевищення експлуатаційних обмежень параметрів двигуна.

Для більш коректної оцінки результатів проведеного аналізу випадки відмов двигуна слід розгля-

дати у відношенні до загальної кількості авіаційних подій та інцидентів, які сталися за період, що аналізується (рис. 2). Проаналізувавши кількість N зареєстрованих відмов з 2016 по 2019 роки [7-10] (рис.2) бачимо, що тенденції до зменшення кількості випадків, пов'язаних з відмовою двигуна не спостерігається. Але за той самий період в Україні збільшилась кількість годин загального польоту (рис. 3).

Отже статистику випадків відмов авіаційних двигунів в польоті слід аналізувати з урахування загальної кількості льотних годин на рік.

З відношення N відмов авіаційних двигунів на ПС до кількості M годин польоту за кожен рік, маємо середню кількість відмов авіаційних двигунів на 100 тис. годин польоту (K) (табл. 2).

Таблиця 2 – Середня кількість відмов авіаційних двигунів 100 тис. годин польоту

Роки	2016	2017	2018	1 пів. 2019
K	1,1	3,1	2,3	4,7

Побудуємо лінію тренду, яка графічно відображає тенденції даних і прогнозує їхні подальші зміни. Лінія тренду має наступний вигляд (рис. 4). Бачимо, що незважаючи на те, що конструктори постійно удосконалюють надійність і тривалість експлуатації авіаційних двигунів, кількість відмов має тенденцію до зростання.

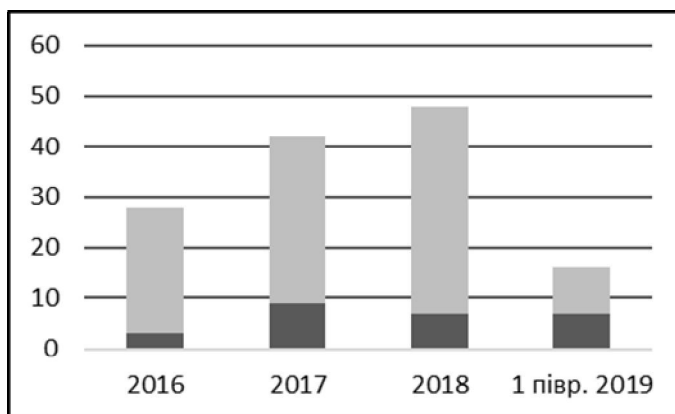


Рис. 2. Кількість зареєстрованих випадків відмов авіаційних двигунів ПС цивільної авіації України (по роках)

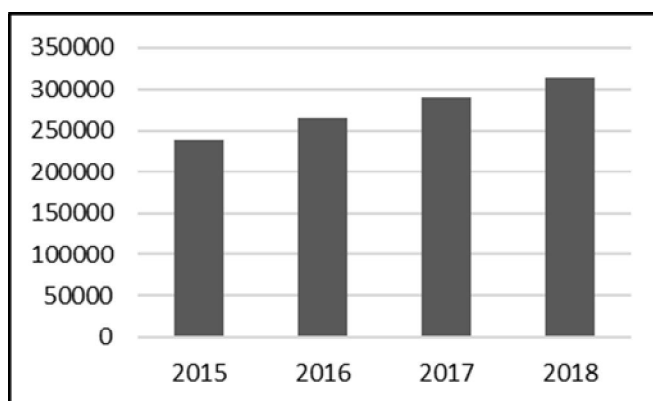


Рис. 3. Кількість годин загального нальоту ПС цивільної авіації України (по роках)

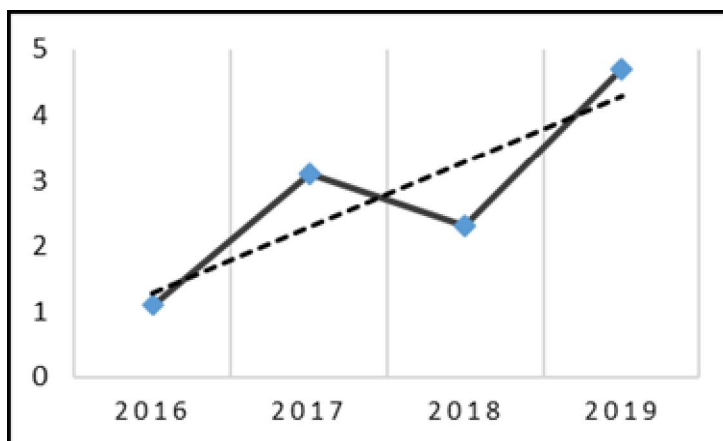


Рис. 4. Динамічний аналіз рівня безпеки польотів по ймовірності авіаційної події «Відмова двигуна на ПС»

З наведених вище результатів аналізу можна зробити висновок, що проблема відмови авіаційних двигунів на сучасному етапі являється достатньо актуальною.

Остаточне рішення відносно подальшого продовження польоту при появі особливого випадку у польоті нормативними документами покладено на командира ПС, але авіадиспетчер має постійно бути готовим до видачі відповідної рекомендації не лише щодо дій екіпажу в даний момент, але й щодо прогнозування подальшого розвитку ситуації, щодо переходу з аварійної в катастрофічну.

Згідно із статистикою [11], в подібних ситуаціях у 30-45% випадків пілоти не можуть прийняти жодного рішення через психологічний стрес, в 25-35% випадків вони приймають неадекватні рішення.

Але не можна забувати, що в критичних ситуаціях, нервово-емоційна напруга авіаційних диспетчерів також різко зростає:

- 20% з них не можуть оцінити ситуацію, і тому не приймають жодного рішення,
- 10% – приймають неправильні рішення,
- 22% – впадають в «ступорозний» стан і не діють,

- 34% – виконують непотрібні дії і лише погіршують ситуацію [11].

Необхідність при цьому надати відповідну допомогу викликає додаткову нервово-емоційну напругу і стає на перешкоді виконання диспетчером його основних професійних функцій.

Проблема професійної підготовки авіадиспетчерів в екстремальних польотних ситуаціях в наш час придбала особливого значення у всіх країнах, у тому числі і в Україні.

Удосконалення оцінки ситуації, методів та алгоритмів прийняття рішень в умовах відмови двигуна є актуальною та сучасною задачею дослідження.

Тому доцільно було побудувати модель можливого подальшого розвитку ситуацій у випадку відмови двигуна на ПС в польоті (рис.5).

Для побудови даної моделі було використано інформацію із доступних баз даних по подіям, інцидентам та авіаційних катастрофам, що трапилися раніше з повітряними суднами.

Дана інформація збирається й аналізується, міжнародними й національними організаціями, а також окремими авіакомпаніями.

Було проаналізовано 100 випадків відмови авіаційних двигунів й на цій основі в процентному

співвідношенні висвітлено можливість розвитку тієї чи іншої ситуації. Отже у процентному співвідношенні кількість катастрофічних ситуацій і кількість випадків вдалого завершення польоту складає 25-30%, тобто майже рівні. Випадки, коли польоти повітряного судна з відмовою двигуна завершуються з різного роду пошкодженнями конструкцій літака, чи, навіть, наявності постраждалих, досягають майже половини (50%) випадків. Це, в свою чергу, значно погіршує рівень безпеки цивільної авіації.

Тому подальше вивчення такого особливого випадку в польоті, як відмова авіаційного двигуна і насамперед прогнозування подальшого розвитку особливої ситуації в польоті, якщо вона сталася, являється достатньо актуальним не тільки для екіпажу повітряного судна, але й для майбутніх та діючих авіадиспетчерів. Саме своєчасні та правильні рекомендації екіпажу, надані авіаційним диспетчером, значно сприяють вдалому вирішенню проблеми.

Запропоновану модель (рис. 5) можливого подальшого розвитку ситуацій у випадку відмови двигуна на повітряному судні в польоті в подальшій роботі буде використано при розробці та побудові системи підтримки прийняття рішень авіадиспетчера «HELP».

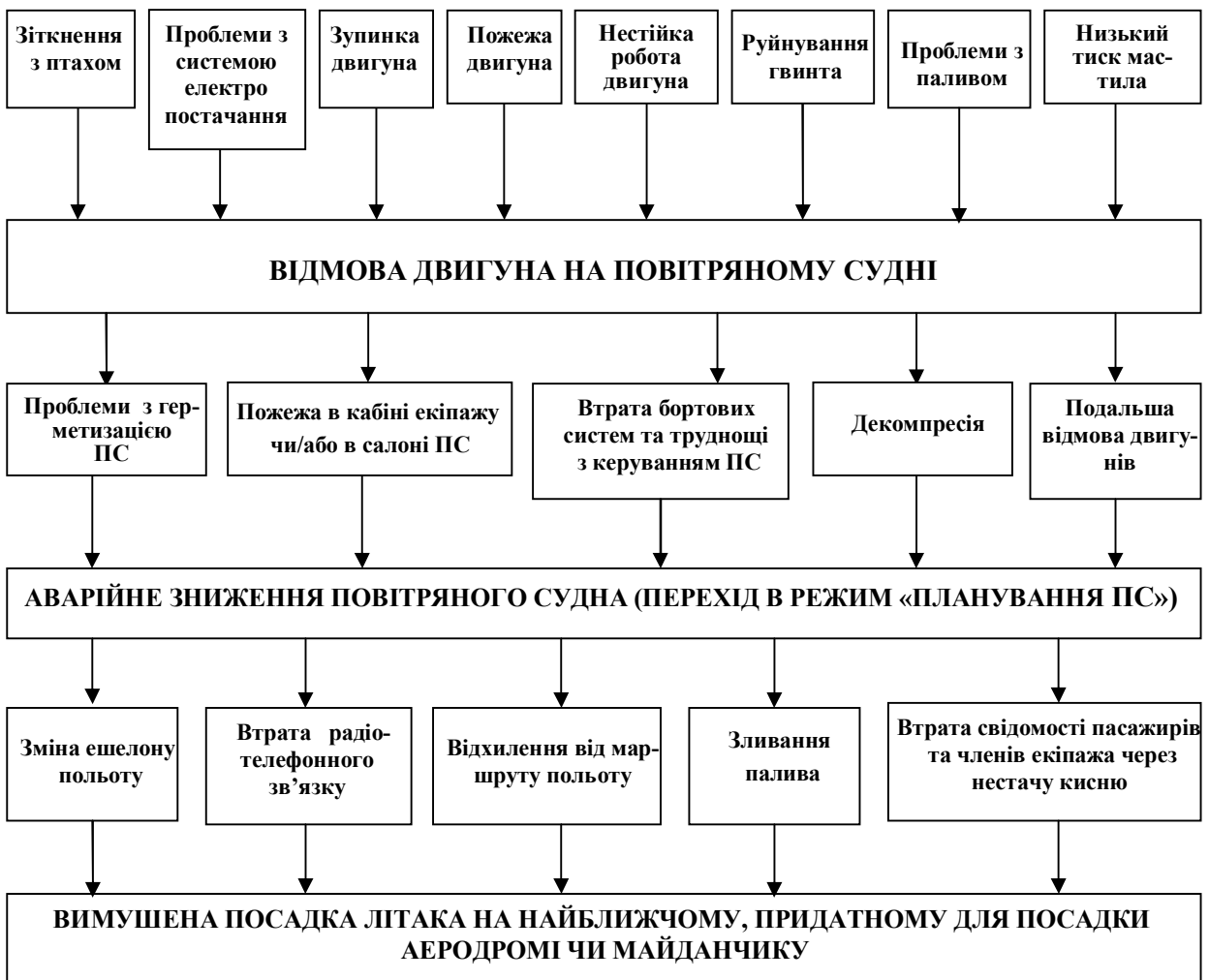


Рис. 5. Модель можливого подальшого розвитку ситуації при виникненні ОБП – відмова двигуна на ПС в польоті

Така система дозволить значно зменшити час, необхідний екіпажу та авіадиспетчеру на визначення оптимального варіанту завершення польоту в разі виникнення позаштатної ситуації – відмова двигуна на ПС в польоті з урахуванням показника ймовірності вдалого завершення польоту при оцінці вибору потенційного місця посадки.

Висновки і напрямки подальших досліджень

Результати аналізу авіаційних подій дали змогу зазначити головне протиріччя: між зростаючою роллю диспетчерів управління повітряним рухом в підвищенні безпеки польотів й відсутністю науково обґрунтованої методики навчання їх на основі аналізу авіаційних подій, пов'язаних з особливими випадками в польоті.

Проведено статистичний аналіз авіаційних подій, що сталися з цивільними повітряними суднами

України, причиною яких стала відмова двигуна в польоті. В результаті даного аналізу встановлено, що кількість авіаційних подій, пов'язаних з відмовою двигуна не має тенденції до зниження, що свідчить про актуальність даної проблеми.

Проведено аналіз прийняття рішень командирами повітряних суден та авіадиспетчерами у особливих випадках в польоті. Встановлено, що додаткове нервово-емоційне навантаження стає на заваді виконанню пілотом та авіадиспетчером їх основних професійних функцій.

У роботі побудовано модель можливого подальшого розвитку ситуацій у випадку відмови двигуна на повітряному судні в польоті. Отримані результати дозволяють розробити рекомендації по вдосконаленню технології роботи авіадиспетчера управління повітряним рухом при виникненні особливого випадку в польоті – відмова двигуна на ПС, а також створити систему підтримки прийняття рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Галлай М. Л. Полет самолета с неполной и несимметричной тягой / Галлай М. Л. - М.: Машиностроение, 1970 – 192с.
2. Неделько С.Н. Оценка эффективности информационной поддержки операторов автоматизированных систем обслуживания воздушного движения / С.Н. Неделько, В.Н. Неделько // Вісник КМУЦА. – К.: КМУЦА, 1999. – № 2. – С. 184-186.
3. База даних з авіаційної безпеки // Режим доступу: <http://aviation-safety.net/index.php>.
4. Европейское агентство по безопасности полетов // Режим доступу: <http://easa.europa.eu>.
5. База даних по авіаційним катастрофам США // Режим доступу: <http://www.ntsb.gov/investigations/summary/AAR0003.html>.
6. База даних авіаційних подій // Режим доступу: <http://www.aviation-accidents.net/>
7. Аналіз стану безпеки польотів за результатами розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами України та суднами іноземної реєстрації, що сталися у 1 півріччі 2019 року // Режим доступу: http://www.nbaai.gov.ua/uploads/pdf/_2019.pdf.
8. Аналіз стану безпеки польотів за результатами розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами України та суднами іноземної реєстрації, що сталися у 2018 році // Режим доступу: <http://www.nbaai.gov.ua/uploads/pdf/Analysis2018.pdf>
9. Аналіз стану безпеки польотів за результатами розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами України та суднами іноземної реєстрації, що сталися у 1 півріччі 2017 році // Режим доступу: http://www.nbaai.gov.ua/uploads/pdf/Analysis_2017.pdf
10. Аналіз стану безпеки польотів за результатами розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами України та суднами іноземної реєстрації, що сталися у 1 півріччі 2016 року // Режим доступу: http://www.nbaai.gov.ua/uploads/pdf/Analysis_2016.pdf
11. Лейченко С. Д. Человеческий фактор в авиации / С. Д. Лейченко, А. В. Малишевский. – Кировоград, 2006. – Кн. 1. – 480 с.

Received (Надійшла) 28.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.11.2019

Modeling of the processes of developing situations for aircraft engine failure in flight

A. Kolesnik, I. Zakharchenko, P. Berdnik

Abstract. The subject matter of the article is the development of the situation when the engine fails in an aircraft. The goal is to build a model of the possible further development of the situation in case of engine failure in an aircraft in flight. The tasks are: a statistical analysis of aviation events that occurred with civil aircraft of Ukraine, the cause of which was the engine failure in flight; analysis the need to study the actions of aviation specialists in special cases from the point of view of making timely, correct decisions in the face of a growing psychoemotional load. The methods used are: methods of analysis and synthesis of complex information systems, methods of simulation and statistical modeling. The following results were obtained. It has been established that the number of accidents related to engine failure does not tend to decrease. It has been established that the additional neuro-emotional load impedes the fulfillment by the pilot and air traffic controller of their basic professional functions. Model of possible situation development in case of a special case in flight - engine failure on an aircraft is built for its further use in practical training of air traffic controllers for action in special cases. **Conclusions.** The results obtained allow us to develop recommendations for improving the technology of operation of the air traffic controller air traffic control in case of a special case in flight - engine failure on the aircraft, as well as to create a decision support system. The direction of further research is development and construction of a decision support system to improve the operation of the air traffic controller.

Keywords: engine failure, special cases, takeoff, landing, pilot, air traffic controller.

С. Г. Кійко¹, Є. А. Дружинін², О. В. Прохоров²

¹ ПрАТ Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» імені А. М. Кузьміна, Запоріжжя, Україна

² Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСАМИ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Анотація. Розроблено агентну імітаційну модель аналізу процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства при реалізації портфеля проектів енергозбереження. Розкрито особливості інформаційної взаємодії агентів в мультиагентній системі, за рахунок механізмів, пов'язаних з децентралізованим мультипроектним плануванням, що включає вирішення ресурсних конфліктів при виконанні завдань, пошук найбільш оптимальних ресурсів, при використанні яких виконання робіт буде відбуватися на найбільш вигідних умовах. Використання даної моделі дозволяє послідовно проводити аналіз проектів з метою виявлення можливості їх реалізації на підприємстві, узгоджувати плани реалізації проектів і плани підприємства на різних рівнях планування. Запропонований підхід має відмінні риси: інтеграція стратегічних рішень (прийняти або відхилити нові проекти) і оперативних аспектів (розподіл ресурсів); можливість гнучкого управління ресурсами.

Ключові слова: портфель проектів енергозбереження, реалізуємість проекту, ризик, розподіл ресурсів, агентна модель, металургійне підприємство.

Вступ

Постановка проблеми. Формування науково-обґрунтованої стратегії енергозбереження має дуже важливе значення для металургійних підприємств при реалізації цілей по економії енергетичних ресурсів, скорочення викидів, мінімізації витрат і підвищення ефективності та конкурентоспроможності. Загальна мета підвищення енергоефективності на підприємстві реалізується на основі управління портфелем енергозберігаючих проектів, які спрямовані на виконання таких завдань: оптимізація енергетичного балансу; мінімізація споживання енергоресурсів (палива – природного та доменного газу, електроенергії, теплової енергії); оптимізація енергоефективності та ін. Оцінити і відібрати для реалізації проекти енергозберігаючих заходів, об'єктивно оцінити частку кожного енергоресурсу в загальному потоці, визначити енергоємність окремого виробництва, цеху, всього підприємства, скорегувати стратегічний напрямок в управлінні енергоресурсами дозволить наявність моделі енергоспоживання на підприємстві. Для реалізації оптимального управління енергетичними потоками пропонується метод, який використовує мультиагентний підхід, що полягає в формуванні спільноти агентів енергоспоживання, енергоперетворення, енерговиробництва і покупки електроенергії на зовнішньому ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі особливості моделювання енергоспоживання на верхньому рівні управління розглядаються в роботі [1]. Авторами визначено основні закономірності формування енергоспоживання на металургійних підприємствах.

В роботі [2] використовуються гібридні мережі Петрі для моделювання та аналізу металургійних процесів. Динамічний потік матеріалів і зміни в ре-

альному часі кожного технологічного стану в металургійному процесі наочно моделюються за допомогою цієї моделі.

В роботі [3] розглядається проблема моделювання виробництва і споживання електроенергії в гібридних енергосистемах. Моделювання дозволило розрахувати оптимальну кількість і параметри компонент отримання відновлюваної електроенергії в залежності від прогнозованої потреби в її споживанні.

У роботі [4], виходячи з забезпечення стабільності енергопостачання та нормальної безпеки виробництва, використовувався метод математичного програмування та модель динамічної математичної оптимізації для встановлення надлишків газу в оптимальному розподілі серед буферних споживачів та диспетчеризації виробництва пару.

Особливості нормування споживання електроенергії у виробництві на підприємствах чорної металургії наведено у роботі [5]. Авторами описано багаторівневу структуру нормування споживання електроенергії за результатами дослідження.

У роботі [6] наведено метод оцінки стану управління енергоресурсами в гірничорудній та металургійній галузях за допомогою мультиплікативної моделі впливу технологічних та управлінських факторів та застосування теорії дискримінації.

У роботі [7] представлені результати оптимізації витрат на електроенергію на прикладі одного з металургійних підприємств, наведено основні відомості про розроблення імітаційної моделі та етап оптимізації.

В роботі [8] сформульовані основні проблеми управління електроспоживанням і енергозбереженням в металургійному виробництві, розглянуті завдання нормування, планування енерговитрат за рівнями управління. Авторами запропонований метод прогнозування витрат енергоресурсів, заснова-

ний на побудові регресійних моделей з включенням фактору часу.

Рішення завдання прогнозування електроспоживання на основі багатofакторного регресійного і кореляційного аналізів наведено в роботах [9; 10].

В роботі [11] дана математична постановка задачі оптимального прогнозу споживання газу на металургійному підприємстві по техніко-економічним критеріях, яка зведена до спеціалізованої задачі нелінійного математичного програмування.

Мультиагентний підхід до управління портфелем проектів розглядається в [12]. Автор наводить системну архітектуру агентної моделі, цілі функціонування і особливості програмної реалізації різних агентів. Однак за межами викладу залишилися моделі поведінки агентів при вирішенні задач портфельного управління. Мультиагентні технології мають значні переваги з точки зору побудови автономних, адаптивних, з можливостями аукціонної і скоординованої взаємодії своїх елементів систем моделювання, що робить їх кращим підходом для вирішення завдання децентралізованого мультипроектного планування.

Мета статті – розроблення агентної моделі управління розподілом енергоресурсів, що базується на взаємодії агентів постачальників, агентів споживання, агентів виробництва і агентів перетворення енергоресурсів, що виконують пошук відповідності на внутрішньому «ринку» наявних енергоресурсів або зовнішньому енергоринку.

Імітаційна модель енергоспоживання на металургійному підприємстві

Агентне моделювання передбачає, що модель включає множину взаємодіючих між собою і з зовнішнім середовищем агентів – інформаційних (програмних) елементів, які мають свої цілі і завдання, внутрішній стан і правила поведінки.

Відмінною особливістю агентних моделей є те, що вони децентралізовані і в них відсутня централізована поведінка системи в цілому. Ці можливості радикально відрізняють агентні системи від існуючих «жорстко» організованих моделюючих програмних систем, забезпечуючи їм таку принципово важливу нову властивість, як здатність до самоорганізації. При цьому окремі автономні «частини» моделюючої програми – агенти – отримують можливість самостійно приймати рішення і домовлятися про те, як повинні вирішуватися завдання, вони набувають власну активність і можуть вступати в різні відносини між собою, ініціювати діалог з користувачем в заздалегідь не визначені моменти часу тощо. Таким чином, визначається поведінка на індивідуальному рівні, а глобальна поведінка виникає як результат діяльності багатьох агентів, кожен з яких має свої власні правила, функціонує в загальному середовищі і взаємодіє із середовищем і з іншими агентами.

Розглядаючи основні переваги агентного підходу при імітаційному моделюванні процесів управління енергоспоживанням на металургійному підприємстві, слід зазначити наступне:

- принцип автономності різних частин моделюючої програми (агентів), спільно функціонуючих

в розподіленій системі, де одночасно протікає множина взаємопов'язаних процесів;

- наявність елементів індивідуальної поведінки (від простих умов і обмежень, до складних, які враховують цілі та стратегії);

- агенти мають можливість навчатися, адаптуватися і змінювати свою поведінку, мати динамічні зв'язки з іншими агентами, які можуть формуватися і зникати в процесі функціонування і ін.

Застосування мультиагентного підходу в задачах імітаційного моделювання виробничих систем вимагає вирішення в тій чи іншій мірі наступних основних завдань: визначення складу і розподіл ролей агентів серед основних компонент системи імітаційного моделювання; формування розподіленої бази знань агентів і побудова загальної онтології, що розділяється всіма агентами; створення інтелектуальних агентів з механізмами логічного висновку рішень; організація і планування дій інтелектуальних агентів; розробка механізмів взаємодії агентів, включаючи такі як, кооперація, конкуренція, компроміс, конформізм, ухилення від взаємодії, вироблення стратегій агентів при колективній поведінці.

Одним з центральних завдань при агентному моделюванні поточкових процесів енергоспоживання в даній системі є формування множини альтернативних варіантів споживання і виробництва енергоресурсів. Така модель необхідна для оперативного управління процесами розподілу і споживання енергоресурсів у внутрішньозаводських та внутрішньоцехових мережах, а також для контролю за режимами роботи основного енергоємного технологічного обладнання. В цьому випадку найпростіший варіант організації мультиагентної спільноти при вирішенні завдань з управління розподілом енергоресурсів може бути заснований на взаємодії агентів постачальників, агентів споживання, агентів виробництва і агентів перетворення, що виконують пошук відповідності на внутрішньозаводському «ринку» наявних енергоресурсів або зовнішньому енергоринку (рис. 1).

Конкуруючи і кооперуючись між собою при укладанні «угод» для спільного вирішення виникаючих завдань (для чого агенти можуть використовувати розвинені економічні механізми, включаючи пайову участь, аукціони тощо), агенти можуть забезпечити системі нові можливості в самоорганізації для постійного пристосування до ситуацій, що швидко змінюються.

Використання поняття аукціону в переговорах агентів забезпечує можливість явної передачі «корисності» (у вигляді ціни) від одного агента до іншого. Аукціон виступає в якості ринкового механізму самоорганізації колективної поведінки, і з його допомогою можна сконструювати таку схему торгів, яка забезпечить необхідні характеристики мультиагентної системи. На аукціоні деякі ресурси, які необхідні для досягнення мети декількома агентами, виставляються на «продаж». Ресурси ці обмежені, тому агенти змагаються між собою в процесі торгів. Можливості «покупки» ресурсів агентами також обмежені, а доцільність покупки оцінюється функцією корисності ресурсу, яка, як правило, обчислю-

ється у вигляді різниці між доходом від використання ресурсу і витратами на його покупку.

Ієрархічна архітектура агентної моделі припускає наявність одного або декількох агентів «метарівня», які здійснюють координацію розподіленого вирішення задач іншими агентами. Крім того, можливі ситуації коли агенти можуть утворювати коаліцію з метою оптимізації своїх витрат, наприклад, на залучення ресурсів. При цьому використання ідей колективної поведінки призводить до необхідності

вирішення багатьох проблем. Серед них слід виділити такі проблеми, як формування спільних планів дій, можливість врахування інтересів компаньйонів агенту, синхронізація спільних дій, наявність конфліктуючих цілей, наявність конкуренції за спільні ресурси, організація переговорів про спільні дії, розпізнавання необхідності кооперації, вибір підходящого партнера, навчання поведінці в колективі, декомпозиція задач і розподіл обов'язків, правила поводження в колективі, спільні зобов'язання тощо.

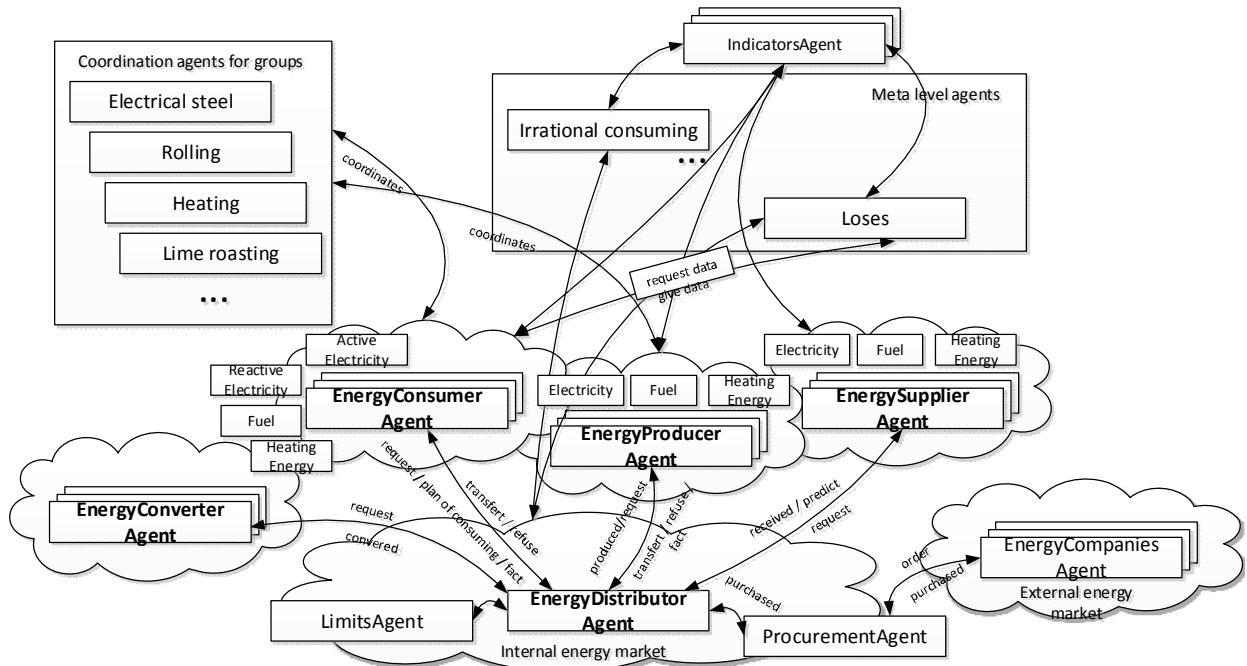


Рис. 1. Агентна модель енергоспоживання на металургійному підприємстві

Розглянемо, як розглянуті особливості знаходять своє відображення в розробленій агентній імітаційній моделі аналізу процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства.

При формуванні агентного уявлення імітаційної моделі необхідно виходити з виділення елементів з індивідуальною поведінкою. Всі куплені або вироблені енергоресурси продаються по трансфертній ставці агенту енергорозподілу, всі споживані енергоресурси купуються у агента енергорозподілу по трансфертній ставці. При цьому агенти енергоспоживання видають агенту енергорозподілу прогноз споживання на певну перспективу. При нестачі ресурсів у них вони купують їх у агента енергорозподілу. Агенти енергоспоживання підрозділяються за видами споживаного енергоресурсу: активної та реактивної електроенергії, теплової енергії, палива. Наприклад, для кожного агента споживання електроенергії задаються наступні параметри: потужність, розрахунковий струм лінії, марка, перетин і довжина кабелю лінії, питомий опір дроту, кількість автоматів приймачів електроенергії, кількість магнітних пускачів приймачів електроенергії, коефіцієнт завантаження лінії. Так формуються характеристики електрообладнання кожної ділянки.

Агент енергорозподілу фіксує заявки в своїй базі, контролює ліміти і акцептує їх, узгоджуючи зі

станом ресурсів, поточного енергобалансу і допустимими ризиками. Тут визначається поточний стан, в рамках якого виявляється нестача або надлишок енергоресурсів на визначений термін. Відповідно йде або використання наявних енергоресурсів або продаж енергоресурсів або покупка енергоресурсів.

Таким чином виходить ринок "на добу вперед" – він працює за принципом біржі, на якій визначається індикативна ціна на енергоресурс, на яку орієнтуються всі учасники при укладанні «договорів» і подають свої заявки сьогодні на завтра.

Передача ресурсів агентам енергоспоживання здійснюється відповідно визначених пріоритетів, призначення яких – це вирішення проблеми об'єднання досягнення цільових установок за показниками ефективності та прибутковості. Агент енергорозподілу може їм і відмовити у виділенні ресурсів, якщо є розбіжність з сумою заявки, мається на даний момент дефіцит або перевищені встановлені ліміти. Перевірені заявки акцептуються. Акцептовані трансфертні операції беруть участь в подальших розрахунках при моделюванні, відхилені угоди можуть бути допрацьовані агентами (зміна обсягу енергоресурсів, терміну та інших атрибутів угоди) або видалені. Отримавши відповідь від агентів про здійснення операції, агент енергорозподілу також здійснює реєстрацію фактичних витрат енергоресурсів.

У разі перевищення ліміту виникає конфліктна ситуація, яку необхідно вирішити: або збільшити ліміт, або відхилити заявку, або переглянути енергобаланс і, відповідно, перерозподілити енергоресурси, взявши їх з інших агентів (груп).

Агент енергорозподілу виконує регулюючу функцію при встановленні трансфертних цін на паливо, електро- та теплоенергію, його основним завданням є врегулювання структури енергобалансу. Система цін і тарифів на енергоресурси повинна стимулювати зниження витрат виробників і економне витрачання енергії споживачів. Агент енергорозподілу також здійснює взаємодію з агентом закупівлі з метою покриття дефіцитів енергоресурсів.

Формування такого внутрішнього ринку енергоресурсів створює умови для формування різних тарифних пропозицій для споживачів, в тому числі в залежності від характерного для них графіка навантаження (наприклад, в залежності від часу доби). Основним механізмом взаємодії агентів стають переговори на укладення внутрішніх трансфертних угод по залученню / споживання ресурсів між агентами енергоспоживання, поставки, виробництва і агентом енергорозподілу.

Важливою особливістю пропонованої моделі є також об'єднання розглянутих агентів в групи за напрямками. Критеріями виділення окремих груп агентів в моделі є: виконання комплексу взаємопов'язаних і близьких послуг і операцій, які становлять єдиний технологічний ланцюжок; наявність власного ринку діяльності; наявність органу, що управляє і координує діяльність. Передбачається виділення різних груп агентів виходячи з виконуваних операцій (електросталь, прокат, випал, очищення, термічна обробка і інші), ефективного обслуговування за видами клієнтів (корпоративне замовлення, державне замовлення, інвестиційне замовлення), за територіальним принципом. У загальному випадку агент може належати декільком групам. Для кожної сформованої групи здійснюється генерація агента-координатора (Electrical steel, Rolling, Heating і ін.). Багатовимірний і детальний розподіл показників енергоспоживання в рамках подібної структури дає можливість оцінювати ефективність і впливати на окремі структурні підрозділи, напрямки бізнесу і продукти.

Кожному агенту в моделі призначається свій перелік показників-індикаторів, моніторинг яких може вказувати на наблизення або настання небажаних (ризикових) ситуацій. Перевищення значеннями індикаторів встановлених меж є підставою для активації різних механізмів і ситуативних сценаріїв. Так при зниженні напруги нижче встановленого значення автоматично включається механізм балансування для його підтримки. Так само якщо мають місце втрати. В цьому випадку в системі генеруються агенти IndicatorAgents – їх число відповідає можливим варіантам вирішення ситуації, кожен з яких намагається здійснити своє завдання паралельно, реалізуючи сформований сценарій незалежно від інших і не маючи уявлення про їхнє існування. Тобто розрахунки ведуться одночасно для всіх альтернативних стратегій і сценаріїв. При цьому стратегії можуть бути скориго-

вані по ходу проведення розрахунків. Кожен агент постачальник, агент виробництва або споживач повинен відповідати за свій небаланс, тобто відхилення від графіка виробництва або споживання. Укладаючи двосторонні контракти або купуючи енергоресурси на внутрішньому або зовнішньому ринку на добу вперед, енергопостачальники і енергоспоживачі зобов'язуються забезпечити своє споживання і виробництво в певні години на відповідному рівні. При цьому вони є сторонами, відповідальними за баланс особисто (або входять на договірній основі в певну балансуєчу групу агентів). Забезпечити стовідсоткову відповідність контрактам на практиці не так вже й просто. Наприклад, можуть погіршитися погодні умови, що спричинить більший попит на електро- чи теплоенергію у споживачів в реальному часі або може статися непередбачений вихід з роботи трансформаторного обладнання та ін.

В рамках розробленої агентної моделі функція метарівня управління енергоефективністю виражається в коригуванні керуючих параметрів, що впливають на поведінку агентів в процесі інформаційної взаємодії (підвищення / зниження виробництва, скорочення витрат і ін.). Вектор керуючих впливів включає в себе коригування: лімітів енергоспоживання; усунення втрат енергоресурсів; використання або продаж енергії, що виробляється в основному виробництві та ін.

Опис механізмів взаємодії агентів імітаційної моделі

Розглянемо механізм взаємодії агентів енергоспоживання і агента енергорозподілу докладніше.

На кожному кроці, взявши до уваги витрати на енергію за попередні періоди, агент енергоспоживання вирішує, чи варто робити такі дії, як прийняття заходів по підвищенню енергоефективності, наприклад, зниження споживання з метою зниження вартості. Агент енергорозподілу в свою чергу вирішує, чи слід проводити будь-які заходи для коригування поведінки агентів енергоспоживання, засноване на даних споживання за попередній період.

Агент енергорозподілу може надавати «пільги» (премії) агентам енергоспоживання для вжиття заходів щодо підвищення енергоефективності, як засіб зниження загального споживання енергії для підприємства. Енергоспоживання агента буде визначатися за формулою:

$$PU_{iT} = PU_{iT}^{NP} \prod_{t=1}^T PUE_{it}; \quad PU_{iT}^{NP} = MA_i \cdot K^A \times \\ \times \exp(\alpha_1 + \alpha_2 \ln(IT_{iT}) + \alpha_3 \ln(PC_{iT}) + \sum_{j=1}^{n-1} \beta_j TA_j),$$

де PU_{iT} – це енергія, споживана i -м агентом під час T ; PUE_{it} – ефект енергоспоживання від заходів з підвищення енергоефективності під час t ; PU_{iT}^{NP} – змінна, що представляє енергію, яка споживається i -м агентом під час T без урахування впливу заходів по підвищенню енергоефективності; PC_{iT} – це

вартість енергії, яку платить i -й агент під час T ; IT_{iT} – це оборот i -го агента під час T ; MA_i – оцінка ймовірності того, що i -й агент матиме нульове споживання енергії; TA_j – тип агента енергоспоживання; K^A – оцінка розмиття поправочного коефіцієнту зміщення логарифмічного перетворення; α і β є коефіцієнтами регресії.

Таким чином, енергія, споживана агентом в певний період, залежить від типу до якого він відноситься, обороту за період, а також сукупної енергоефективності інвестицій.

Премії від агента енергорозподілу для впровадження агентом енергоспоживання заходів щодо підвищення енергоефективності визначаються такими формулами:

$$EI_{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \sum PU_{it} / \sum PU_{it-1} > PU_{iL} \text{ для } t \geq 1; \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases}$$

$$ER_{it+1} = \begin{cases} U(a, b), & \text{якщо } EI_{i,t+1} = 1; \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де EI є бінарною змінною, що вказує чи субсидує агент енергорозподілу заходи агента енергоспоживання щодо підвищення енергоефективності; $\sum PU_{it}$ – це загальне споживання енергоресурсів для представників цього типу; ER – готовність агента енергоспоживання прийняти ризиковані інвестиції в скорочення енергоспоживання. Чим вище це співвідношення, тим вище повинна бути частка витрат на енергію до того, як агент енергоспоживання інвестує в заходи з підвищення енергоефективності, пов'язані з ризиком. Отже, високий коефіцієнт означає, що агент не схильний до ризику і навпаки; PU_{iL} – константа, що описує поріг, вище якого агент енергорозподілу забезпечить стимули для вжиття заходів щодо підвищення енергоефективності; U позначає рівномірний розподіл. Рівняння для EI вказує, чи збільшиться загальне споживання енергії більш ніж на певне значення в процентному співвідношенні коли агент енергорозподілу надасть субсидії на заходи з підвищення енергоефективності. Рівняння для ER вказує, що агент енергорозподілу повинен субсидювати агентів енергоспоживання, це вплив на профілі ризиків окремих агентів енергоспоживання для вжиття заходів щодо підвищення енергоефективності є стохастичним і описується рівномірним розподілом.

Параметри закону розподілу задаються таким чином, щоб субсидії спонукали агентів енергоспоживання інвестувати в заходи з підвищення енергоефективності. Вживання заходів щодо підвищення енергоефективності для окремого агента енергоспоживання визначається наступним співвідношенням:

$$EE_{it+1} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } PC_i \cdot PU_{it} / IT_{it} > SR_i + ER_{it}; \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases}$$

$$PUE_{it+1} = \begin{cases} U(a, b), & \text{якщо } EE_{it} = 1; \\ 1, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де EE – бінарна змінна, яка показує чи робить агент енергоспоживання будь-які заходи з енергоефективності; PUE_{it} – є ефективність заходів i -го агента по споживанню енергії; SR_i – первісна (за вирахуванням ефекту втручання агента енергорозподілу) готовність агента енергоспоживання проводити заходи з енергоефективності (моделюється нормальним розподілом).

У представленому рівнянні для EE видно, що коли витрата енергії у відсотках від обороту в період часу t вище порога (тобто профілю ризику агента енергоспоживання в цій моделі), агент енергоспоживання робитиме деякі заходи щодо підвищення енергоефективності. Рівняння для PUE показує, що характер впливу заходів по підвищенню енергоефективності по споживанню енергії імовірнісний і моделюється рівномірним розподілом. Діапазон параметрів a і b є наступним $0 < a < b < 1$. Це означає, що заходи щодо підвищення енергоефективності скорочують споживання енергії в порівнянні з попереднім періодом. Слід врахувати, що спочатку моделювання передбачається, що ніяких заходів щодо підвищення енергоефективності ніяким агентом енергоспоживання не робиться і відсутні субсидії і втручання в енергетичний ринок з боку агента енергорозподілу. Надалі при зверненні до агента енергорозподілу агент енергоспоживання може вирішити залишитися на своєму поточному рівні ефективності або підняти шкалу ефективності на більш високий рівень.

Таким чином, збільшення енергоефективності агентів енергоспоживання засноване на аналізі первісної системи параметрів і являє собою багатокроковий процес послідовної зміни станів через реалізацію проектів портфеля енергозбереження.

Модель прийняття рішення встановлює кількісні відносини між показниками стану технічної системи підприємства, експлуатаційними витратами, енергобалансом, операційними і конструктивними характеристиками підрозділів підприємства до і після реалізації енергозберігаючих проектів, зовнішніми впливами, капітальними витратами, що понесені в ході реалізації проектів, періодом моделювання та критеріями вибору проектів.

Далі розглянемо більш докладніше механізми відбору енергоефективних проектів для нашої агентної моделі. При цьому можливе використання двох типів енергоекономічних моделей – елементарна і комплексна. Елементарна відображає технічні та економічні особливості одного енергозберігаючого процесу, який належить одній з підсистем підприємства. Інтегрована дозволяє координувати основні характеристики елементарних проектів, які належать різним підсистемам підприємства (наприклад, для теплосистеми це опалювальна та електрична потужність машин і устаткування, діаметри труб центрального опалення тощо). Так для теплосистеми вартість економії паливного еквівалента є одним з аспектів енергоефективності – це досягається при перемиканні від однієї схеми реалізації до іншої за умови, що, наприклад, потужність і теплова потужність для споживача рівні.

Для того, щоб оцінити взаємозв'язок між станом підприємства, рентабельністю генерації тепла R і цінами на паливо і енергоресурси, пропонується наступне співвідношення:

$$1 + R = r \cdot (\eta_k^{br} - q_{tr loss}) / (k \cdot (1 + r_e \cdot (q_{sn} + q_n))),$$

де $r = c/c_f$, $r = c/c_f$ (c – вартість тепла, c_f – вартість палива, c_e – вартість електроенергії); η_k^{br} – енергоефективність опалювального агрегату; $q_{tr loss}$ – втрати тепла, q_n – втрати електроенергії і q_{sn} – витрати на транспортування енергоносіїв; k – коефіцієнт додаткових витрат, пов'язаних з виробленням теплової енергії.

Виходячи з цього, моделюється можливість підключення агентів енергоспоживання до централізованого теплопостачання агента енергорозподілу. Значення річної економії паливного еквівалента ΔB застосовується в якості критерію енергоефективності:

$$\Delta B = \Delta b_E - (b_{eltr} \cdot b_e + b_{fch}) \cdot Q > 0,$$

де Δb_E – питома економія паливного еквівалента; b_{eltr} – питомі втрати електроенергії при транспортуванні енергоносіїв; b_e – питомі втрати паливного еквіваленту при виробленні електроенергії після підключення споживача; b_{fch} – відноситься до питомих витрат паливного еквівалента, пов'язаних з компенсацією теплових витрат; Q – виробництво тепла на рік.

Встановлення ємності базового Q_b і пікового Q_p навантаження джерел тепла реалізуються з використанням критерію мінімізації сукупних витрат:

$$Z = k_b Q_b + k_p Q_p + n \left(\frac{E_b c_b a_b}{\eta_b} + \frac{E_p c_p a_p}{\eta_p} \right) \rightarrow \min,$$

де k_b і k_p – питомі капітальні витрати базового та пікового навантаження джерел тепла; E_b і E_p – кількість теплової енергії в рік; c_b і c_p позначають ціну первинного джерела енергії в стані базового навантаження і піку; η_b і η_p є коефіцієнтами перетворення первинного джерела енергії, що використовується для виробництва тепла; a_b і a_p – додаткові коефіцієнти витрат в станах базового навантаження і піку, які показують співвідношення між загальними експлуатаційними витратами і енергетичними затратами, понесеними при виробництві теплової енергії; n – період реалізації проекту енергозбереження.

Співвідношення потужностей Q_b і Q_p визначається граничною температурою атмосферного повітря $^{\circ}C t_i$. Якщо температура вище цього рівня, джерело тепла з базовим навантаженням несе теплове навантаження; якщо нижче граничного рівня – як базове навантаження, так і пікові джерела тепла несуть теплове навантаження.

Модель обґрунтовує застосування комбінованих джерел тепла з базовим та піковим навантаженням. Джерело тепла базового навантаження характеризується високою енергоефективністю і великими початковими витратами капіталу, в той час як джерело піку тепла показує відносно низьку енергоефективність і помірні початкові капітальні витрати. Математично задача енергозбереження є такою:

$$EP = e_1 x_1 + e_2 x_2 + \dots + e_i x_i + e_n x_n \rightarrow \max,$$

де EP – загальна економія, отримана за рахунок реалізації енергоефективних проектів; x_i це економія від i -го проекту портфеля; e_i це конкретна річна економія, отримана за рахунок відповідного проекту.

Множина допустимих альтернативних рішень породжується такою системою обмежень:

$$\begin{aligned} kx_1 + k_2 x_2 + \dots + k_i x_i + k_n x_n &\leq K; \\ x_1 &\leq X_1, x_2 \leq X_2, \dots, x_i \leq X_i, x_n \leq X_n; \\ x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_i \geq 0, x_n \geq 0, \end{aligned}$$

де k_i конкретні витрати, понесені при реалізації проекту; x_i позначає максимально можливий ефект від проекту; K – кількість доступних ресурсів для використання, щоб реалізувати весь комплекс розглянутих проектів. Формула описує цільову функцію як загальну економію, отриману від реалізації проектів. Зазначені нерівності є очевидними невід'ємними умовами, які пов'язані з фінансовими обмеженнями і обмеженнями на ефект кожного проекту.

Розглянута задача має сенс, якщо:

$$kx_1 + k_2 x_2 + \dots + k_i x_i + k_n x_n > K.$$

Даний вираз означає, що кількість доступних ресурсів менше, ніж кількість ресурсів, необхідних для реалізації всіх проектів в повній мірі.

З метою розширення діапазону критеріїв відбору енергоефективних проектів зазначену вище цільову функцію можна представити у вигляді комплексного критерію корисності:

$$P = e_1 k_1 / T_{1av} + e_2 k_2 / T_{2av} + \dots + e_n k_n / T_{nav} \rightarrow \max,$$

де T_{iav} – середній ранг i -го проекту на основі критерію p , $T_{iav} = (T_{i1} + T_{i2} + \dots + T_{ia} + \dots + T_{ip}) / p$, T_{ia} – ранг i -го проекту на основі критерію a .

Поряд з періодом окупності, комплексний критерій корисності дозволяє врахувати інші ефекти проекту портфеля, використовуючи експертні методи, наприклад, підвищення енергетичної безпеки тощо. Таким чином були розглянуті деякі з механізмів агентної імітаційної моделі аналізу процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства при реалізації портфеля проектів енергозбереження.

Результати експериментів

Мультиагентну модель розроблено в інструментальному середовищі імітаційного моделювання Anylogic. Розроблена модель дозволяє виявляти, аналізувати та вибирати перспективні проекти з енергозбереження, щоб вибрати серед них найбільш

життєздатний. В результаті експериментів вдалося оптимізувати портфель енергозберігаючих проектів і це дозволило зосередитись на найбільш бажаних цілях. Апробація розроблених моделей та комп'ютерних засобів у ПАТ «Дніпроспецсталь» засвідчи-

ла, що можливе ефективне управління енергоефективністю на основі управління програмами та портфелями проектів. Так в період з 2017 по 2019 рік на підприємстві було запроваджено заходи щодо енергозбереження, які представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Перелік енергозберігаючих проектів портфеля

Енергозберігаючий проект	Вартість, тис. грн.	Всього зекономлено, тис. т. ум. палива	Вартість зекономлених енергоресурсів, тис. грн.
Впровадження пристрою для редукування на ввіді пара №3	350	0,1845	1225
Проведення теплотехнічної наладки термічної печі прокатного цеху	440	0,0360	220
Проведення теплотехнічної наладки нагрівальних колодязів прокатного цеху	270	0,0220	135
Проведення теплотехнічної наладки установок «HELIOS» калібровального цеху	290	0,0244	145
Проведення теплотехнічної наладки камерних печей	315	0,028	157,5
Впровадження інноваційних волокнистих матеріалів для футерування глісажних труб печі дрібносортового прокатного стану	560	0,097	1225
Впровадження перетворювальної техніки в залежності від режимів роботи устаткування	40	0.36	1745
Регулювання тиристорних перетворювачів намагнічування машин ГПА стану прокатного цеху в режимі роботи на холостому ході	50	0,216	1045

У сумі за допомогою даних заходів було заплановано і фактично досягнуто скорочення споживання природного газу на 1,5%, теплоенергії на 2%. За допомогою моделі було проведено оцінювання виконання цільового використання енергетичних ресурсів після реалізації проектів і заходів з енергозбереження. Було розраховано зміну ефективності споживання електричної енергії в результаті впровадження заходів з енергозбереження.

У якості фрагменту на рис. 2 наведено графік накопичених сум фактичного споживання енергоресурсів за один з місяців і цільового енергоспоживання, отриманого в результаті моделювання. Як видно з рисунку, підприємство зменшило споживання палива в результаті проведених заходів з енергозбереження.

Незважаючи на те, що підприємство не досягло цільового рівня енергетичної ефективності похибка прогнозу при моделюванні енергоспоживання для металургійного підприємства знаходиться на задовільному рівні.

Споживання електроенергії підприємством за 9 місяців 2019 року склало 276188,9 тис. кВт·г (рис. 3). Завдяки реалізації програми енергозбереження у 2019 році відповідно за такої ж період 2018 року підприємство заощадило 31025,2 тис. кВт·г та 61171,3 тис. куб.м. природного газу.

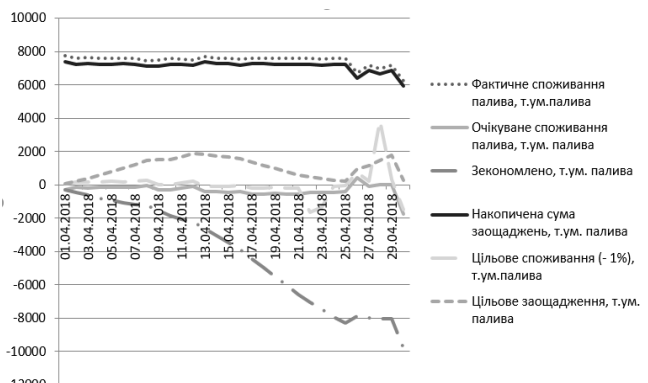


Рис. 2. Порівняння результатів моделювання і фактичного споживання палива



Рис. 3. Баланс споживання енергії ПАТ «Дніпроспецсталь» за 9 місяців 2019 року

Порівняно з 2011 р. споживання електроенергії на виробництво сталі для плавки зменшилось більш ніж на 30%.

Також частка витрат електроенергії на виробництво сталі для плавки зменшилась з 71% у 2011 році до 66% у 2019 році.

Висновки

Таким чином, розроблено агентну імітаційну модель аналізу процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства при реалізації портфеля проектів енергозбереження.

Переваги мультиагентного підходу – можливість побудови автономних, адаптивних, з можли-

востями аукціонної і скоординованої взаємодії своїх елементів систем моделювання, що робить їх кращим підходом для вирішення завдання децентралізованого мультипроектного планування портфеля проектів енергозбереження.

Використання даної моделі дозволяє послідовно проводити аналіз проектів з метою виявлення можливості їх реалізації на підприємстві, узгоджувати плани реалізації проектів і плани підприємства на різних рівнях планування. Запропонований підхід має відмінні риси: інтеграція стратегічних рішень (прийняти або відхилити нові проекти) і оперативних аспектів (розподіл ресурсів); можливість гнучкого управління ресурсами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shemetov A. Identification of the electricity consumption of metallurgical enterprises at the highest levels of management / A. Shemetov. – 2005. – pp. 135-140.
2. Yujuan R. Modeling and Simulation of Metallurgical Process Based on Hybrid Petri Net / R. Yujuan, H. Bao // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 157.
3. Shcherbakov M.V. Multiagent system for modeling the production and consumption of electricity in hybrid power systems / M.V. Shcherbakov, A.S. Nabiullin, V.A. Kamaev // Engineering Bulletin of the Don. – 2012, vol. 20, no. 2. – pp. 217-221.
4. Jing-yu Liu An Optimization Model Based on Electric Power Generation in Steel Industry / Liu Jing-yu, Cai Jiu-ju // Mathematical Problems in Engineering. – vol. 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/924960>
5. Khoshimov F.A. Analysis of electricity consumption rationing at enterprises ferrous metallurgy [Електронний ресурс] / F.A. Khoshimov, I.U. Rakhmonov. – Technical science and innovation. – vol. 2018, iss. 1. – Режим доступу: <https://uzjournals.edu.uz/btstu/vol2018/iss1/9>.
6. Lyakhomskii A.V. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises / A.V. Lyakhomskii, A.B. Petrochenkov, E.N. Perfil'eva // Russian Electrical Engineering. – 2015. – vol. 86, iss. 6. – pp. 305–308.
7. Optimization of Energy Consumption of the Enterprise Using Simulation Modeling / V. Krysanov, A. Danilov, V. Burkovsky, P. Gusev, K. Gusev // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". – 2019. – pp 707-715.
8. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.
9. Bianco V. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models / V. Bianco, O. Manca, S. Nardini // Energy. – 2009. – № 34. – pp. 1413-1421.
10. Dordonnat V. Dynamic factors in periodic time-varying regressions with an application to hourly electricity load modeling / V. Dordonnat, S.J. Koopman, M. Ooms // Computational Statistics and Data Analysis. – 2012. – №56. – pp. 3134-3152.
11. Казаринов Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления топливных газов на металлургических предприятиях / Л.С. Казаринов, Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – №7(79). – 2007. – С. 24-26.
12. Lixin Zhou Multi-Agent Based Project Portfolio Management Approach / Zhou Lixin // Proceedings of the International Symposium on Intelligent Information Systems and Applications. – 2009. – pp. 240-243.

Received (Надійшла) 04.11.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.12.2019

Imitation modeling of energy resources management processes of metallurgical enterprises

S. Kiyko, E. Druzhinin, O. Prokhorov

Abstract. As a result of the analysis of the energy saving program structure at the metallurgical enterprises, it was found the problems that are solved by the energy saving projects are inefficient consumption (significant losses) of energy resources (gas, thermal energy, electricity), control over the costs formation and the results of improvements in energy consumption. The overall goal of improving energy efficiency at the enterprise is realized through the management of a energy-saving projects portfolio, which are aimed at fulfilling the following tasks: optimization of energy balance; minimization of natural gas consumption; optimization of energy efficiency, etc. Success criteria for an energy-saving project include: efficiency; operating costs, losses, etc. It should be noted that it is difficult to objectively estimate the share of each energy resource in the total flow, to determine the energy intensity of individual production, departments and the whole enterprise, etc. To implement optimal management of energy flows at a metallurgical enterprise we proposed the method based on a multi-agent approach, which consists in forming a community of agents for energy consumption, energy conversion, energy production and the purchase of energy resources on the external market. An agent-based simulation model has been developed for analyzing the energy management processes of a metallurgical enterprise when implementing a portfolio of energy-saving projects. The article described the features of the information interaction of agents in a multi-agent system, due to mechanisms associated with decentralized multi-project planning, including the resolution of resource conflicts when performing tasks, the search for the most optimal resources, during which the work will be performed on the most favorable conditions.

Keywords: portfolio of energy saving projects, project feasibility, risk, resource allocation, agent model, metallurgical enterprise.

V. Kononov, O. Kononova, I. Odinkii

Kharkiv National Air Force University named by Ivan Kozhedub, Kharkov, Ukraine

DESIGNING THE PRINCIPAL TRANSMISSION SCHEME FIBER OPTIC DEVICE FIBER OPTICAL GYROSCOPE

Abstract. The subject of the article is the fiber-optic fiber-optic gyro system used in inertial navigation, control and stabilization systems. The purpose of the article is to study the design of the schematic diagram of the transmitting device of the optical fiber system and to make the necessary calculations for the transmitting device of the optical fiber system. **Problem to be solved** is the justification of technical solutions, the implementation of which in the practice of measurement will allow to substantiate the process of designing the schematic diagram of the transmission device of the fiber-optic system of the fiber-optic gyroscope used in inertial navigation, control and stabilization systems. **The article deals with:** stages of designing the schematic diagram of the transmitting device of the fiber optical system; certain calculations have been made regarding the damping of the site in relation to the designed single-fiber communication system; diagram of the optical transmission device under development. **Conclusions:** It is advisable to use the proposed technical solutions both in the modernization of existing fiber-optic gyroscopes and in the creation of perspective samples intended for use in inertial navigation, control and stabilization systems.

Keywords: optical transmitter, inertial navigation, control and stabilization systems.

Introduction

Formulation of the problem. Potential opportunities for the use of fiber optic gyro(FOG) are based on its potential applications as a sensitive element of rotation in inertial navigation, control and stabilization systems. Industrial development of single-mode low-attenuation dielectric fiber has allowed to create highly sensitive(FOG) used as a rigidly fixed on the body of the carrier of the sensitive element (sensor) rotation in inertial control and stabilization systems. But, when designing FOG, there is a number of problems, namely, the technology of producing elements FOG; extreme sensitivity to very small external and internal disturbances and instability. The solution to these problems is by improving the technology of element production in (FOG), one of which is the development of a transmission device for a fiber optic system, which is not possible without the designing of its schematic diagram, which confirms the relevance of the proposed article.

Literature analysis. The principles and organizational foundations of metrological support, as well as the role and place of metrological support in Ukraine, are set out in the Law of Ukraine "On metrology and metrological activity" [1], State standard of Ukraine 2681-94. Metrology: terms and definitions [2], in ISO [3, 4], in articles [5-8], in literature [9 - 14]. Mathematical models for determining the number of orders for guaranteed metrological servicing of weapons and military equipment samples, taking into account their importance, are set out in [5]. The technique of forecasting the capabilities of metro-technical units for the repair of damaged military measuring equipment is described in the article [6]. Theoretical models of heavy objects are described in [7].

The issues of compensation for excess noise in a fiber-optic gyroscope are thoroughly discussed in [8]. General theoretical information about fiber-optic gyroscope has been thoroughly considered in the literature [9]. At the same time, issues related to dynamic pressure measurement remain open.

The purpose of the article is to study the design scheme of the transmitting device of the optical fiber system and to make the necessary calculations for the transmitting device of the optical fiber system.

Basic material

The first step in the design of the principle scheme of the transmitting device of the fiber optic system is to select the type and brand of optical emitter based on the requirements to its technical characteristics, namely: radiation power; wavelength of radiation; the width of the radiation spectrum; modulation frequency; pumping current; threshold current. For the correct selection of the optical emitter in the first stage, you must specify the determination of the radiation power. To do this, determine the required optical power at the output of the optical transmitter. The final decision on the choice of a brand of emitter is made on the basis of compliance with the technical characteristics of the device, the required radiation wavelength, the width of the radiation spectrum and the time of increase of the optical signal power.

In the second step, the transistor V2 is selected in the direct modulator circuit (DMC) and the modulator is calculated. The transistor is selected based on the characteristics of the previously determined optical emitter, namely the pumping current and the threshold current. It is necessary to take into account the maximum allowable power of the transistor and its limiting frequency. Next, the operating point is specified and the elements of the modulator circuit are calculated. In the third stage, the power amplifier should be calculated (III) through the use of a high-speed operational amplifier, which is included in the circuit voltage-to-current converter. It is necessary to correctly select the type of operational amplifier according to the required upper frequency and power, which is the scattering, and and-each to calculate the elements of the circuit voltage - current converter.

In the fourth stage, the device of automatic control of the optical signal level at the output of the trans-

mitting device is organized (АПИ). his will use a VD3 photodiode connected to one of the poles of the directed optical coupler(OC) and detector АПИ, made on the integrated circuit K175ДА1 (Fig. 1). Let's consider the more carefully proposed steps. When calculating the transmitter power output and selecting the type of radiation emitter, it should be taken into account that the value of the power difference at the output of the optical emitter and at the input of the optical receiver should exceed maximum attenuation made by station and line structures on the transmitter-receiver section. Currently available optical modules provide a sufficiently low level of reception. Reception devices of some systems provide a level of reception of 0.01 mkV (-50 dB), which when performing the calculations, we will assume the default.

We propose the damping of the plot on the designed single-fiber communication system:

$$\alpha = I \left(\alpha_{OB} + \frac{\alpha_{H3}}{I_{\sigma}} \right) + 2\alpha_3 + 2\alpha_{PZCLK} + 2\alpha_1, \quad (1)$$

where is $I = 8 \text{ km}$ - length of the plot; $\alpha_{OB} = 2 \text{ DB}$ - attenuation of one kilometer of optical fiber; $\alpha_1 = 2 \text{ DB}$ - attenuation of the signal in the device combining and branching signals; $\alpha_{PZCLK} = 1 \text{ DB}$ - attenuation of the signal in the device PZCLK; $\alpha_3 = 1,4 \text{ DB}$ - attenuation of the signal in the plug connectors (the norm $\alpha_{P3} = 1,5 \text{ DB}$); $\alpha_{H3} = 0,2 \text{ DB}$ - signal attenuation in non-detachable connectors (by norms, $\alpha_{H3} = 0,2 \text{ DB}$); $I_{\sigma} = 2 \text{ km}$ - the optical fiber cable length.

Let's make some calculations.

We calculate the damping of the plot for the designed single-fiber communication system:

$$\alpha = 8 \left(2 + \frac{0,2}{2} \right) + 2 \cdot 1,4 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 2 = 25,6 \text{ dB}.$$

Calculate the minimum power level:

$$P_1 = P_{PR} + \alpha = -50 + 25,6 = -24,4 \text{ dB.}, \text{ or}$$

$$P_2 = 10^{0,1(-24,4)} \cdot 1 \text{ mW} = 1,585 \text{ mW}.$$

where is $P_{PR} = -50 \text{ dB}$ - optical signal level at reception.

Thus, the output power of the transmitter module must be at least 1.5 MW.

In addition, the radiation source must operate at a wavelength of 1550 μm and provide a modulation frequency of at least 8.5 MHz. The ILPN-1500 semiconductor laser best meets the following requirements and has the following characteristics:

- 1) radiation power: $P_z = 5 \text{ MW}$;
- 2) radiation wavelength: $\lambda = 1 \text{ 310 } \mu\text{m}$;
- 3) the width of the radiation spectrum: $\Delta = 3 \text{ nm}$;
- 4) modulation frequency: $F_m = 250 \text{ MHz}$;
- 5) pumping current: $I_n = 50 \text{ mA}$;
- 6) threshold current: $I_{\text{пор}} = 30 \text{ mA}$;
- 7) operating voltage: 1,5 V;
- 8) operating temperature range: $-40^\circ \pm 60^\circ$.

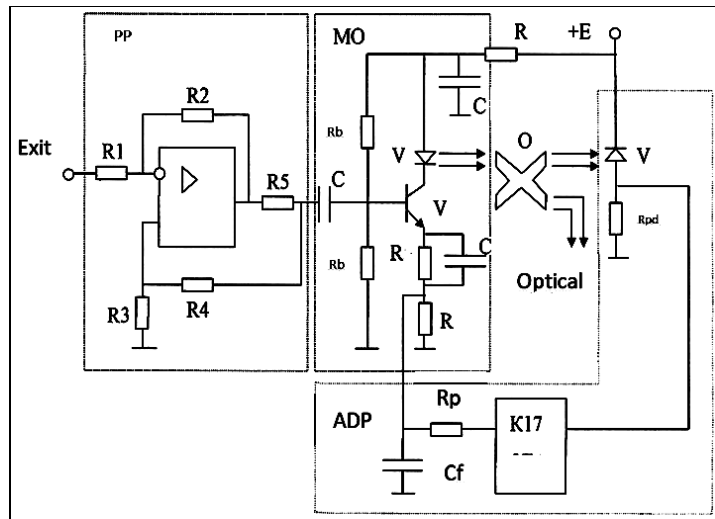


Fig. 1. Schematic of the optical transmission device

The next step is to calculate the output stage. First of all, let's choose a transistor, where we will be guided by the following requirements to its technical characteristics, namely: DC collector current of at least 120 mA; Frequency gain greater than 8.5 MHz. The following requirements are satisfied by the silicon n-p-n transistor KT660B. Which is intended for use in switching and switching devices, in circuits of computers, in generators of electrical oscillations, and having the following electrical parameters:

- static coefficient h_{21e} current in scheme 3E at $U_k = 10 \text{ V}$ in $I_c = 2 \text{ mA}$: $h_{21} = 450$;
 - saturation voltage of the collector - emitter U_k при $I_k = 500 \text{ mA}$ $I_{\sigma} = 50 \text{ mA}$, not more than 0.5 V;
 - saturation voltage base - emitter U_b at $I_k = 500 \text{ mA}$, not more than 1.2 V;
 - the capacity of the collector junction C_k at $U_k = 10 \text{ V}$, not more than 10 pF;
 - the reverse current of the collector U_k at $U_k = 10 \text{ V}$, not more than 1 μA ;
 - the reverse current of the emitter U_e at $U_{be} = 4 \text{ V}$, not more than 0,5 μA ;
- Limiting operational data:
- constant voltage collector - base $U_{k\text{бmax}} 30 \text{ V}$;
 - constant voltage collector - emitter $U_{k\text{эmax}}$ при $R_{be} < 1 \text{ k}\Omega 30 \text{ V}$;
 - constant voltage collector - emitter $U_{k\text{эmax}}$ при $I_e \leq 10 \text{ mA} 25 \text{ V}$;
 - constant voltage base - emitter $U_{б\text{эmax}} 5 \text{ V}$;
 - constant power collector $I_{k\text{max}} 800 \text{ mA}$;
 - constant power dissipation of the $P_{\text{max}} 0.5 \text{ W}$.

Next, determine the mode of operation of the transistor (operating point). To select the mode, we use the family of the output characteristics of the transistor for the scheme with a common emitter which parameter is the base current (Fig. 2).

It is necessary to fulfill the condition regarding the collector rest voltage: $U_k \leq 0.45 E_{k\text{max}}$ (taking into account the given condition) $U_k = 6 \text{ V}$. Considering that a threshold current of 40 mA, is required to modulate a semiconductor laser, then $I_{k0} = 40 \text{ mA}$. In this case, the rest current of the base

$I_b = 0.135 \text{ mA}$. Since the maximum pumping current of the laser is 120 mA , the maximum collector current will be, $I_{k \max} = 120 \text{ mA}$, in this case $U_{ke \max} = 1.7 \text{ V}$ and $I_{\sigma \max} = 0.47 \text{ mA}$. According to the input characteristics of the transistor (Fig. 3) we determine the voltage of the rest base and the amplitude value $U_{\sigma 0} = 0.71 \text{ V}$ and she amplitude characteristics $U_{\sigma \max} = 0.74 \text{ V}$.

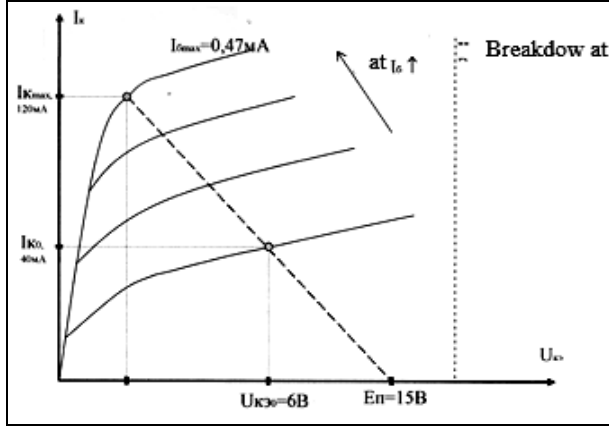


Fig. 2. Family of the output characteristics of the transistor for the circuit with the common emitter

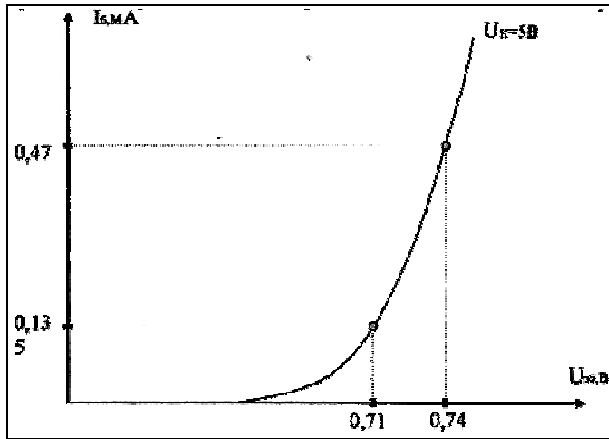


Fig. 3. Family of input characteristics of a transistor for a circuit with a common emitter

Thus, the mode of operation of the transistor is determined by the following parameters:

- collector rest voltage: $U_{k0} = 6 \text{ V}$;
- collector rest current: $I_{k0} = 40 \text{ mA}$;
- base rest current: $I_{b0} = 0.135 \text{ mA}$;
- base rest voltage: $U_{\sigma 0} = 0.71 \text{ V}$;
- base current amplitude: $I_{\sigma \max} = 0.47 \text{ mA}$;
- collector voltage amplitude: $U_{k \max} = 1.7 \text{ V}$;
- collector current amplitude: $I_{k \max} = 120 \text{ mA}$;
- voltage amplitude at the base: $U_{\sigma \max} = 0.74 \text{ V}$.

The transistor is included in the scheme with a common emitter, and the semiconductor laser is in the collector circuit. In this case, the voltage drop in the emitter circuit must satisfy the following condition:

$$U_E^R = 0.15 E_n, \quad (2)$$

where is E_n - where is the supply voltage of the modulator.

Define the supply voltage $E_n = 15 \text{ V}$, in this case: $U_{R_E} = 0.15 \cdot 15 = 1.8 \text{ V}$, where the resistance R_E will be calculated by the formula:

$$R_E = \frac{U_{R_E}}{I_{K0} + I_{BO}} = \frac{1.8}{(40 + 0.135) \cdot 10^{-3}} = 44.85 \Omega.$$

The current I_D of the divider should be at least 5 - 10 times lower than the rest current of the base I_{VO} :

$$I_D = 10 \cdot I_{VO} = 10 \cdot 0.135 = 1.35 \text{ mA}.$$

In order to stabilize the mode of operation of the circuit between the voltage at the emitter resistance and the filter resistance, we define that the filter resistance voltage is equal $U_{R_f} = 1 \text{ B}$. In this case, the filter resistance is determined as follows:

$$R_f = \frac{U_{R_f}}{I_{K0} + I_{BO} + I_D} = \frac{1}{(40 + 0.135 + 1.35) \cdot 10^{-3}} = 24.11 \Omega.$$

The voltage drop at the divider support is R_b equal to the sum of the voltage drop at the support in the emitter circuit and the shear voltage at the base of the transistor at the emitter resistance and the filter resistance, we define that the filter resistance voltage is equal. In this case, the filter resistance is determined as follows:

$$U_{R_b} = U_{R_E} + U_{bo} = 1.8 + 0.71 = 2.51 \text{ V}.$$

In this case, the resistance of the divider is R_b :

$$R_b = \frac{U_{R_b}}{I_D} = \frac{2.51}{1.35 \cdot 10^{-3}} = 1.86 \text{ k}\Omega.$$

Find the resistance in the emitter circuit R_e :

$$R_E = \frac{E_n - U_{R_b} - U_{R_f}}{I_D + I_{BO}} = \frac{12 - 2.51 - 1}{(1.35 + 0.135) \cdot 10^{-3}} = 5.72 \text{ k}\Omega.$$

For a circuit with emitter stabilization, the supply voltage is distributed between the three resistors of the output circuit (R_E, R_K, R_F), by a laser emitter and a transistor:

$$E_P = U_{KEO} + U_{R_E} + U_{R_K} + U_{R_F} + U_D. \quad (3)$$

where is $U_D = 2 \text{ V}$ - voltage drop on a semiconductor laser; U_{R_F} - voltage drop at the support in the collector circuit.

From here:

$$U_{R_K} = E_n - U_{K_{EO}} - U_{R_E} - U_{R_f} - U_D = 1.2 \text{ B}$$

In this case the resistance in the collector circuit is:

$$R_K = \frac{U_{R_K}}{I_{K_O}} = \frac{1.2}{40 \cdot 10^{-3}} = 30 \Omega.$$

The next step is to calculate the matching amplifier. For what, as a reinforcing element, it is intended to use a high-speed operational amplifier included in the scheme of the Converter voltage - current (also known as an amplifier with complex steepness). The scheme of the matching amplifier is presented in Fig. 1 (functional group PP). A resistor that selects a current that is designed to provide feedback to a positive input clamp. The resistance value R_5 , is determined based on the following condition:

$$R_5 = \frac{R_H}{10}, \quad (4)$$

where is R_H – the load resistance of the amplifier, which is the input resistance of the direct modulator and exactly parallel connection of the resistor divider R_D (of two in parallel connected resistors in the base circuit R_B) and the input resistance of the transistor R_{0_E} , equal to:

$$R_H = \frac{R_{0_E} \cdot R_D}{R_{0_E} + R_D}. \quad (5)$$

The input resistance of the transistor is calculated according to the following relation:

$$R_{0_E} = \frac{U_{VM} - U_{VO}}{I_{VM} - I_{VO}} = \frac{0.74 - 0.71}{(0.47 - 0.135) \cdot 10^{-3}} = 90 \Omega.$$

The resistance of the divider is calculated according to the following relation:

$$R_D = \frac{R_V' \cdot R_V''}{R_V' + R_V''} = \frac{5.72 \cdot 10^3 \cdot 1.86 \cdot 10^3}{(5.72 + 1.86) \cdot 10^3} = 1.40 \text{ k}\Omega.$$

In this case, the load resistance of the amplifier is equal to:

$$R_H = \frac{R_{0_E} \cdot R_D}{R_{0_E} + R_D} = \frac{90 \cdot 1.4 \cdot 10^3}{90 + 1.4 \cdot 10^3} = 84 \Omega,$$

and the resistance R_5 is equal to:

$$R_5 = \frac{R_H}{10} = \frac{84.18}{10} = 8.5 \Omega.$$

The amplitude value of the voltage drop at the resistance R_5 is equal to:

$$\Delta U_{R_5} = I_V \cdot R_5 = (0.47 - 0.135) \cdot 10^{-3} \cdot 8.42 = 0.003 \text{ V}$$

Required from the scheme, the gain is equal to the ratio of the amplitude of the output voltage to the

amplitude of the input voltage. Since the input of the coordinating amplifier is signal from the code converter, the amplitude of the input signal is

$$\Delta U_0 = 5 - 0.7 = 4.3 \text{ V}.$$

In this case, the gain of the scheme is:

$$K = \frac{\Delta U_{R_5}}{\Delta U_0} = \frac{0.003}{4.3} = 0.000653.$$

Let's resistors denominations R_1 , R_2 , R_3 and R_4 are chosen to be the same, each of which must exceed the resistance R_5 at least 20 times. Consider the following resistance values under this condition:

$$R_1 = R_3 = R_4 = 2000 \cdot R_H = 2000 \cdot 84.18 = 168 \text{ k}\Omega.$$

The resistance R_2 sets the gain of the circuit and is defined as follows:

$$R_2 = R_1 \cdot K = 168.36 \cdot 10^{-3} \cdot 6.56 \cdot 10^{-4} = 110 \Omega.$$

Next, we calculate the device automatically adjusts the level of the optical signal at the output of the transmitting device, which provides stabilization of the average power of the laser radiation.

The device ARP includes the following basic elements (functional group ARP in Fig. 1): a photodiode for converting the optical radiation emitted from the output of the laser into an electric current; an automatic level control detector and a DC amplifier made on an integrated circuit.

It should be noted that the sensitivity of the photodiode does not play a role in this case, therefore, when choosing the type of photodiode, we will be guided by such parameters as reliability and low cost. In our case, when using a semiconductor laser ILPN-1550, the manufacturer of this laser predicted that when using semiconductor lasers in different devices, the developers would use a radiation-based stabilization method based on feedback.

And according to this, the design of a semiconductor laser ILPN-1550 already contains a photo sensor with an optical splitter.

Conclusions

1. The article proposes a schematic diagram of the transmission device of a fiber-optic system of a fiber-optic gyroscope.

2. The proposed scheme (Fig. 1) used a laser emitter ILPN-1550 operating at a wavelength of 1550 nm and 5 mW, which has an output optical power of radiation. In the scheme of the direct modulator used silicon n-p-n transistor KT660B which is intended for use in switching and pulse devices. To match the output of the code converter and the input of the modulator, a matching amplifier is introduced on a high-speed operational amplifier KP140YD11. To stabilize the average laser power, a device for automatic control of the optical signal level, including the integrated circuit K175DA1 used as an ADC detector and DC amplifier.

3. The proposed transmission device is designed to work in the composition of digital optical gyroscopes operating at a speed 8 Mbits/s.
4. It is advisable to use the proposed technical solutions both in the modernization of existing fiber-optic gyroscopes and in the creation of perspective samples intended for use in inertial navigation, control and stabilization systems.

REFERENCES

1. Кононов В.Б., Бурцева В.В. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості Системи обробки інформації: зб. наук. пр. ХНУПС. – Вип.1 (147). – Харків, 2017. – С. 88–92.
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., Науменко А.М., Водолажко О.В., Коваль О.В., Кондрашова І.І. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. - Харків: ХНУПС, 2017. – С. 288.
4. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
5. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
6. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
7. Кучук, Г.А. Концептуальний підхід до синтезу структури інформаційно-телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук, І.В. Рубан, О.П. Давікоза // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2013. – Вип. 7 (114). – С. 106-112.
8. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
9. Кучук Г. А., Можаяев А. А. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2007. № 8 (27). С. 261-271.
10. Кононов В.Б. Застосування електричних вимірювань засобами вимірювальної техніки в умовах проведення АТО: навч. посіб. / В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Коваль та ін.. – Х.:ХНУПС, 2018. – 392 с.
11. Instrumentation and general principles of sensors. Part 1 / В.Б. Кононов, А.М. Науменко та ін. – Х.:ХНУПС, 2018. – 64 с.
12. Організація метрологічного забезпечення військ (сил). Ч. 1 : навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, П. М. Яблонський. – К. : НУОУ, 2009. – 356 с.
13. Організація застосування пересувних засобів метрологічного обслуговування: навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, О. В. Ярошенко. – К.: НУОУ, 2009. – 356 с.
14. Кузнецов І. Б., Марценківський В. Т., Ярошенко О. В., Буяло О. В., Проценко В. О. Удосконалення парку пересувних лабораторій вимірювальної техніки як фактор підвищення оперативності та ефективності метрологічного обслуговування складних систем // Збірник наукових праць КНУ. Вип. 32. – К. : ВІКНУ, 2011. – С. 33–46.

Received (Надійшла) 21.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.12.2019

Проектування принципової схеми передавального пристрою волоконно-оптичної системи волоконно-оптичного гіроскопу

В. Б. Кононов, О. А. Кононова, І. Г. Одинокий

Анотація. У статті запропоновано принципову схему пристрою передачі волоконно-оптичної системи волоконно-оптичного гіроскопа. **Предметом** вивчення в статті є волоконно-оптична система волоконно-оптичного гіроскопу, що використовуються в інерціальних системах навігації, керування й стабілізації. **Метою статті** є дослідження щодо проектування принципової схеми передавального пристрою волоконної оптичної системи та проведення необхідних розрахунків щодо передавального пристрою волоконної оптичної системи. **Задача, що вирішується,** – обґрунтування технічних рішень, впровадження яких в практику вимірювання дозволять обґрунтувати процес проектування принципової схеми передавального пристрою волоконно-оптичної системи волоконно-оптичного гіроскопа, що використовуються в інерціальних системах навігації, керування й стабілізації. **В статті розглядається:** етапи проектування принципової схеми передавального пристрою волоконної оптичної системи; проведені певні розрахунки, щодо заґа-сання ділянки щодо проектованої одноволоконної системи зв'язку; схема оптичного передавального пристрою, що розробляється. Запропонована схема використовувала лазерний випромінювач LPN-1550, що працює на довжині хвилі 1550 нм і 5 мВт, що має вихідну оптичну потужність випромінювання. У схемі прямого модулятора використовується кремнієвий n-p-n транзистор КТ660В, який призначений для використання в комутаційних та імпульсних пристроях. Для відповідності виходу перетворювача коду та входу модулятора на швидкісний операційний підсилювач КР140YD11 вводиться відповідний підсилювач. Для стабілізації середньої потужності лазера встановлено пристрій для автоматичного управління оптичним сигнальним рівнем, включаючи інтегральну схему К175DA1, що використовується як детектор АЦП та підсилювач постійного струму. **Висновки.** Пропонований пристрій передачі призначений для роботи у складі цифрових оптичних гіроскопів, що працюють зі швидкістю 8 Мбіт / с. Запропоновані технічні рішення доцільно використовувати як при модернізації існуючих волоконно-оптичних гіроскопів, так і при створенні перспективних зразків, що призначені для роботи в інерціальних системах навігації, керування й стабілізації.

Ключові слова: оптичний передавальний пристрій, інерціальні системи навігації, керування й стабілізації.

P. Sedlacek, A. Forgac, E. Zaitseva

University of Žilina, Žilina, Slovakia

NEW MATRIX BASED ALGORITHM FOR CALCULATION OF IMPORTANCE MEASURES

Abstract. The system reliability/availability is complex term that is evaluated based on numerous indices and measures. There are different methods for the calculation of these indices and measures. Some of the most used are importance measures. These measures allow to evaluate the influence of fixed system components or set of components to the system reliability/availability. Importance measures are used to allow for various aspects of the impact of system elements on its failure or operability. Analysis of element importance is used in the system design, diagnosis, and optimization. In this paper new algorithm for the calculation some of importance measures is developed based on the matrix procedures. This paper goal is development of new algorithm to calculate importance measures of the system based on the matrix procedures that can be transformed in the parallel procedures/algorithm. This algorithm is developed based on the application of Logical Differential Calculus of Boolean logic for importance analysis of system. The application of parallel algorithm in importance analysis allows the evaluation of system of large dimension. Importance specific of the proposed matrix procedures for calculation of importance measures is the application of structure function for the mathematical representation of investigated system. This function defined the correlation of the system components states and system reliability/ availability. The structure function in this case is defined as truth vector to be used in the matrix transformation. The truth vector of Boolean function is column of the truth table of function if the values of the variables are lexicographically ordered.

Keywords: Structure function; Importance measures; Logical Differential Calculus; Direct Partial Boolean Derivatives.

Introduction

One of parts of the reliability analysis is importance analysis [1, 2]. The importance analysis allows evaluation of influence of every system component to the system reliability or availability. This evaluation is implemented based the special indices that are named *Importance Measures* (IMs). IMs are used today to allow for various aspects of the impact of system elements on its failure or operability. Analysis of element importance is used in the system design, diagnosis, and optimization. There are different algorithms to compute these measures that are caused by the mathematical representation of investigated system [3]. The structure function has been introduced for system representation as one the first mathematical model and in case of the system analysis in stationary state can be interpreted as Boolean function [4]. This function maps the system components states and system state.

Authors of studies [2, 5, 6] shown that the reliability analysis of system can be implemented by application of Logical Differential Calculus. The algorithms for calculation of frequency indices have been studied in [6]. The definition and computation of IMs based on Logical Differential Calculus, in particular *Direct Partial Boolean Derivatives* (DPBD), have been proposed and investigated in [2, 5]. These derivatives allow investigating of the function value change depending on the change of the value of the function variable. The interpretation of the structure function in term of the Boolean function permits to study the system state change depending on the change of the failure or repairing of the component.

The computational complexity of the calculation of IMs based on the system structure function depends on the system dimension (number of system components). Authors of papers [5, 7] propose to use the *Binary*

Decision Diagram (BDD) for the structure function representation to decrease the computational complexity of algorithms for reliability analysis. The application of BDD in importance analysis of system and IMs calculation have been considered in [5, 8]. Other approach of this computational complexity decreasing is the use of parallel procedure [9, 10]. The correlation of the parallel algorithms and matrix procedures has been studied in [11]. The transformation of traditional computational procedures for the calculation of indices and measures in matrix form is important step in the design of parallel algorithms. In this paper we consider and propose new definition of IMs based on the matrix procedure and algorithm for their calculation based on new definitions. This transformation of traditional definition of IMs into matrix form needs the special representation of structure function by matrix or vector. For this representation is used the truth vector of structure function introduced in [11] for definition of Boolean and Multiple-Valued functions. Some aspects of the matrix algorithms for calculation of DPBD have been investigated in [12]. In particular, the matrices to transform of truth vector of logical function into truth vector of logical derivative have been proposed. But author of [12] studied the Logical Differential Calculus for Multiple-valued logic and didn't considered specifics of Boolean logic, that is used in reliability analysis. The application of parallel algorithm in importance analysis allows the evaluation of system of large dimension.

1. The structure function

Let's a system consist of n components. The system can have two possible state in point of view of its availability: working and failure. Every component state is designated as x_i ($i = 1, \dots, n$) where the i -th component working state is interpreted as $x_i = 1$ and $x_i = 0$ indicates the component failure. The set of

components states (x_1, \dots, x_n) is named the state vector. The system availability depends on components states. Every system component is characterized by the probability of its state. The probability of the i -th component failure is $q_i = \Pr\{x_i = 0\}$. The probability of the i -th component working is $p_i = \Pr\{x_i = 1\} = 1 - q_i$. These initial data allow analysis in stationary state that doesn't take into account the changes of the system and its components depending the time [1, 5, 6].

The evaluation of the investigated system needs forming its mathematical representation. One of possible mathematical representation is the structure function, which maps the sets of components states system state. Taking into account the notations of components states the structure function $\varphi(\mathbf{x})$ of the system of n components is defined as [5]:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \varphi(x_1, \dots, x_n): \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}.$$

The system analysis takes into account next assumption [13]:

- a) the system and its components have two states: up (working) and down (failed);
- b) all system components are relevant to system;
- c) the failure and repair rate of the components are constant;
- d) repaired components are as good as new;
- e) the system structure function is monotone non-decreasing that mean any component failure can not cause improve of the system working (reliability) [4, 6].

The equation of the structure function agrees with the Boolean function. It allows us to use mathematical approach of Boolean algebra for the structure function investigation. In particular, in papers [2, 5] the approach of Logical Differential Calculus has been used for importance analysis of the system represented by the structure function. In paper the analytical representation of the structure function in form of formula has been used. Such representation causes the specific of algorithms for calculation of importance measures. In this paper we propose to develop algorithms for calculation of importance measures based on the matrix procedures that can be transform into parallel regular algorithms. The application of parallel algorithms allows using proposed procedures for calculation of importance measures for system with large dimension.

The development of matrix procedures assumes the representation of initial data by matrix or vector. Therefore, the structure function should be defined by vector or matrix. In Boolean algebra there is the representation of Boolean function by truth vector [11]. The truth vector of Boolean function is column of the truth table of function if the values of the variables are lexicographically ordered [11, 12].

Therefore, the structure function of any system can be represented by truth vector of 2^n elements unambiguously:

$$\mathbf{x} = [x^{(0)} x^{(1)} x^{(2)} \dots x^{(2^n-1)}]^T.$$

For example, consider the trivial system of three components ($n = 3$) in Fig. 1, a.

The structure function of this system is shown as truth table is shown in Fig. 1, b.

According to this truth table the truth vector of the structure function of the considered system

$$\mathbf{x} = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1]^T.$$

Let us mention the useful property of the truth vector. The number of the truth vector element in binary representation corresponds to values of function variables for this function value if components of the truth vector is number from 0 to 2^n-1 [11]. For example, consider the truth vector element $x^{(5)} = 1$ of the structure function of the system in Fig.1. The state vector for this function value is defined by the transformation of the parameter $i = 5$ into binary representation:

$$i_{10} = 5 \Rightarrow (i_1, i_2, i_3)_2 = (1, 0, 1).$$

Therefore, the state vector for the 5-th element of truth vector \mathbf{x} of the considered structure function in Fig. 1 is $(x_1\ x_2\ x_3) = (1\ 0\ 1)$. It allows us to declare that the element $x^{(5)} = 1$ agrees with the structure function value $\varphi(1, 0, 1) = 1$.

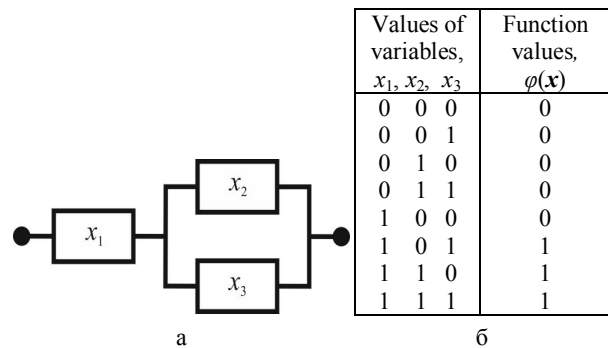


Fig. 1. Example of system (a) and its structure function's truth table (b)

2. Logical Differential Calculus

A Logical Differential Calculus is part of algebra logic for investigation of dynamic properties of logical function by logical derivatives. There are different types of logical derivatives [14, 15]. One of them is logical derivatives that is often interpreted as logical difference and defined by equation:

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{x})}{\partial x_i} = \varphi(0_i, \mathbf{x}) \oplus \varphi(1_i, \mathbf{x}),$$

where symbol \oplus is operation XOR and the operand $\varphi(0_i, \mathbf{x})$ is the structure function value when the i -th component is in state 0 ($x_i = 0$), and the second operand $\varphi(1_i, \mathbf{x})$ is the structure function value when the i -th component is in state 1 ($x_i = 1$).

This type of derivatives allows us to investigate the result of the system component state change, but this derivative is not fixed the direction of the state change. This flaw can be leveled by the use of other type of logical derivatives that is named *Direct Partial Boolean Derivatives* (DPBD) [14].

In analysis of Boolean functions, a DPBD allows identifying situations in which the change of a Boolean variable results the change of the value of Boolean function. In case of reliability analysis, DPBD allows investigation the influence of a structure function variable (=component state) change on a function value change

(=system state). Therefore, a DPBD of the structure function permits indicating components states (state vectors) for which the change of one component state causes a change of the system state (availability) [2].

DPBD can be used to analyze how a specific change of component state (from 0 to 1 or from 1 to 0) affects the system functionality (from 0 to 1 or from 1 to 0). This derivative for the system structure function change from j to \bar{j} with respect to variable x_i change from a to \bar{a} is defined as:

$$\frac{\partial \varphi(j \rightarrow \bar{j})}{\partial x_i(a \rightarrow \bar{a})} = \{\varphi(a_i, \mathbf{x}) \leftrightarrow j\} \wedge \{\varphi(\bar{a}_i, \mathbf{x}) \leftrightarrow \bar{j}\},$$

where $\varphi(a_i, \mathbf{x}) = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, a, x_{i+1}, \dots, x_n)$,

$a, j \in \{0, 1\}$;

\leftrightarrow is the symbol of equivalence operator (logical bi-conditional);

\wedge denotes Boolean operation AND;

\bar{a} is a negation of the argument a .

The matrix interpretation of DPBD can be introduced for the truth vector of DPBD that is calculated based on the truth vector of the structure function. According to the definition of the DPBD $\partial \varphi(j \rightarrow \bar{j}) / \partial x_i(a \rightarrow \bar{a})$ the truth vector of this derivative is calculated as [12]:

$$\frac{\partial \mathbf{x}(j \rightarrow \bar{j})}{\partial x_i(a \rightarrow \bar{a})} = (\mathbf{P}^{(i,a)} \cdot \lambda_j(\mathbf{x})) \cdot (\mathbf{P}^{(i,\bar{a})} \cdot \lambda_{\bar{j}}(\mathbf{x})),$$

where \mathbf{x} is the truth vector of the structure function;

$\lambda_s(\mathbf{x})$ is the vector literal calculated according to:

$$\begin{aligned} \lambda_s(\mathbf{x}) &= \lambda_s([x^{(0)} x^{(1)} \dots x^{(2^n-1)}]^T) = \\ &= [s \leftrightarrow x^{(0)} \quad s \leftrightarrow x^{(1)} \quad \dots \quad s \leftrightarrow x^{(2^n-1)}]^T, \text{ for } s \in \{j, \bar{j}\}; \end{aligned}$$

$\mathbf{P}^{(i,l)}$ is differentiation matrix of the dimension $2^{n-1} \times 2^n$ of the variable x_i for $l \in \{a, \bar{a}\}$ that is formed as:

$$\mathbf{P}^{(i,l)} = \mathbf{M}_{i-1} \otimes [l \leftrightarrow 0 \quad l \leftrightarrow 1] \otimes \mathbf{M}_{n-i},$$

matrices \mathbf{M}_{i-1} and \mathbf{M}_{n-i} are diagonal matrices of the dimension $2^{i-1} \times 2^{i-1}$ and $2^{n-i} \times 2^{n-i}$ accordantly.

The vector literals $\lambda_j(\mathbf{x})$ and $\lambda_{\bar{j}}(\mathbf{x})$ indicate the variables values (state vectors) for which the structure function has value j and \bar{j} (the system state j and \bar{j}) accordantly. The matrices $\mathbf{P}^{(i,a)}$ and $\mathbf{P}^{(i,\bar{a})}$ indicate the variables values (state vectors) for which value x_i is a and \bar{a} .

For example, compute the truth vector of the DPBD with respect to the variable x_2 $\partial \mathbf{x}(1 \rightarrow 0) / \partial x_2(1 \rightarrow 0)$ for the structure function of the system shown in Fig.1. The truth vector of this system structure function is $\mathbf{x} = [0 0 0 0 0 1 1 1]^T$. According to the equation for the calculation of truth vector of DPBD we obtain:

$$\frac{\partial \mathbf{x}(1 \rightarrow 0)}{\partial x_2(1 \rightarrow 0)} = (\mathbf{P}^{(2,1)} \cdot \lambda_1(\mathbf{x})) \cdot (\mathbf{P}^{(2,0)} \cdot \lambda_0(\mathbf{x})),$$

where vector literals are $\lambda_1(\mathbf{x}) = [0 0 0 0 0 1 1 1]^T$ and $\lambda_0(\mathbf{x}) = [1 1 1 1 1 0 0 0]^T$,

$$\mathbf{P}^{(2,1)} = \mathbf{M}_1 \otimes [0 \quad 1] \otimes \mathbf{M}_1 =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes [0 \quad 1] \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}^{(2,0)} = \mathbf{M}_1 \otimes [1 \quad 0] \otimes \mathbf{M}_1 =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes [1 \quad 0] \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$\frac{\partial \mathbf{x}(1 \rightarrow 0)}{\partial x_2(1 \rightarrow 0)} = (\mathbf{P}^{(2,1)} \cdot \lambda_1(\mathbf{x})) \cdot (\mathbf{P}^{(2,0)} \cdot \lambda_0(\mathbf{x})) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

The truth vector of DPBD $\partial \mathbf{x}(1 \rightarrow 0) / \partial x_2(1 \rightarrow 0)$ doesn't depend on the variable x_2 and has only one non-zero value that agree with the variables values: $x_1 = 1$ and $x_3 = 0$. The state vector $(x_1 x_3) = (1 0)$ allows us to declare only one situation of the system failure depending the fault of the second component. It is possible if the first component is in the working state and the third component was fault before the breakdown of the second component.

The truth vectors of other DPBDs of this system for analysis of its failure can be calculated similar. According to these derivatives, the considered system fails depending the fault of the second component in case if the third component was not functioning and the first component has been working. The fault of the third component cause the system failure in two situations: the first component should be in the working state and the second component can be fault or working.

Table 1 – The truth vectors of DPBDs for the system failure analysis (the system is shown in Fig. 1)

Variables values, $x_1 x_2 x_3$	$\frac{\partial \mathbf{x}(1 \rightarrow 0)}{\partial x_1(1 \rightarrow 0)}$	$\frac{\partial \mathbf{x}(1 \rightarrow 0)}{\partial x_2(1 \rightarrow 0)}$	$\frac{\partial \mathbf{x}(1 \rightarrow 0)}{\partial x_3(1 \rightarrow 0)}$
0 0 0	–	–	–
0 0 1	–	–	0
0 1 0	–	0	–
0 1 1	–	0	0
1 0 0	0	–	–
1 0 1	0	–	1
1 1 0	0	1	–
1 1 1	1	0	1

3. Importance Measures

One of the first of *Importance Measures* (IMs) has been introduced by Birnbaum [16]. These measures allow evaluating the influence of the fixed system component changes (failure or restore) to the system failure or working. In paper [2] new DPBDs-based method for

calculation of IMs has been developed. The well-known IM as *Birnbaum Importance* (BI), *Structure Importance* (SI) and *Criticality Importance* (CI) have been defined in terms of DPBD. Let us summarize these definitions of IMs (Table 2) for the system failure based on DPBDs.

According to the definition of SI in Table 2 this measure can be considered as relative number of situations in which a given component is critical for the system activity. It can be defined as proportion of system state for which the fault of the fixed component causes the system failure in space of possible system states. The number of such caused system state can be defined by DPBD $\partial\varphi(1 \rightarrow 0)/\partial x_i(1 \rightarrow 0)$ and nominated as $\rho_i^{(1 \rightarrow 0)}$. The SI of the i -th component is defined as [2]:

$$SI_i = \rho_i^{(1 \rightarrow 0)} / 2^{n-1},$$

where $2^n - 1$ is a size of the DPBD.

Table 2 – Importance Measures Definitions

Importance Measure	Meaning
SI	The SI concentrates only on the topological structure of the system. It is defined as the probability of the system failure depending on the failure of the component breakdown based on the topological specific of the system
BI	The BI of a given component is defined as the probability that the component is critical for the system work.
CI	The CI of a given component is calculated as the probability that the system failure has been caused by the component failure, given that the system is failed.

The BI of component i defines as the probability that the i -th system component is critical for system failure. It is probability of the system failure if the i -th system component was fault. This probability can be defined as the probability of all critical states. These states is computed by the DPBD $\partial\varphi(1 \rightarrow 0)/\partial x_i(1 \rightarrow 0)$ [2]:

$$BI_i = Pr\{\partial\varphi(1 \rightarrow 0)/x_i(1 \rightarrow 0) \leftrightarrow 1\}.$$

One very often used IM is CI. This measure is defined similar to the BI, but take into account of the probability of the i -th component fault [1]. Therefore, this measure can be calculated based on DPBD to:

$$CI_i = BI_i \cdot (q_i/U).$$

where q_i is the probability of the i -th component fault and U is the system unavailability that is calculated based on the structure function as:

$$U = Pr\{\varphi(\mathbf{x}) = 0\}.$$

The considered IMs are computed based on the DPBD. The definition of the structure function by truth vector allows us to compute these measures based on the matrix procedures.

4. Matrix procedures for Importance Measures calculation

The SI of the i -th component can be computed by the matrix procedure as:

$$SI_i = O_{\neq 0}(\partial\mathbf{x}(j \rightarrow \bar{j})/\partial x_i(a \rightarrow \bar{a})) / 2^{n-1},$$

where $O_{\neq 0}$ is number of non-zero values of the truth vector of DPBD $\partial\mathbf{x}(j \rightarrow \bar{j})/\partial x_i(a \rightarrow \bar{a})$.

The BI of the i -th component is defined as the probability of all critical states that are indicated by non-zero values of the truth vector of DPBD:

$$BI_i = Pr\{\partial\mathbf{x}(1 \rightarrow 0)/x_i(1 \rightarrow 0) \leftrightarrow 1\}.$$

The CI of the i -th component is calculated based on BI. A matrix procedure can be transform in parallel procedure according to [12].

To illustrate the analysis of system based on SI, BI and CI using DPBDs consider the system in Fig. 1 and compute these measures for all system components. Values of IMs for this system are computed in Table 3. According to these IMs, the first component has the most influence on the system failure from point of view of the system structure, because the values of the SI, BI are greatest for this component. The CI is maximal for the second and third components and, therefore, it indicates the first component as non-important taking into account the probability of failure of this component (it is minimal for this component, i.e. $q_1 = (1 - p_1) = 0.10$).

Table 3 – IMs for the system in Fig.1

Component	x_1	x_2	x_3
Probability of component state, p_i	0.90	0.70	0.65
SI_i	0.75	0.25	0.25
BI_i	0.90	0.32	0.27
CI_i	0.46	0.49	0.49

So, DPBDs are one of possible mathematical approaches that can be used in importance analysis, and they allow us to calculate all often used IMs (Table 2). Mathematical background of its application for the definition of IM has been considered in papers [2, 5]. In this paper new algorithm for the calculation of DPBD based on a parallel procedure is developed.

Conclusion

In this paper the new algorithm шы proposed for the calculation of IMs based on the matrix procedures. This algorithm is based on the use of the DPBDs. The computational complexity of the proposed algorithm is less in comparison with algorithm based on the typical analytical calculation (Fig. 2).

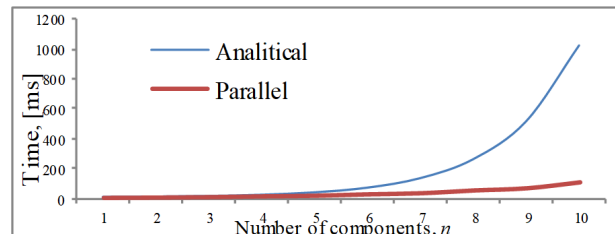


Fig. 2. Computation time for calculation of DPBDs based on analytical and parallel procedures

The proposed algorithm for the calculation of IMs based on the parallel procedures can be used in many practical applications.

Acknowledgement

The Slovak Research and Development Agency (Agentúra na Podporu Výskumu a Vývoja) supported

this work under the contract no. APVV-18-0027 titled “New methods development for reliability analysis of complex system”.

REFERENCES

1. Kuo, W., Zhu, X. *Importance Measures in Reliability, Risk and Optimization*, John-Wiley & Sons Publ., 2012. 440 p.
2. Zaitseva, E., Levashenko, V. Importance Analysis by Logical Differential Calculus. *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 2, pp. 171–182.
3. Levitin, G. Lisnianski, A. *Multi-state System Reliability Analysis and Optimization, Handbook of Reliability Engineering*, London, Berlin, NY, Springer Publ., 2003. 342 p.
4. Barlow, R. E., Proschan, F. Importance of system components and fault tree events. *Stochastic Processes and their Applications*, 1975, vol. 3, no. 2, pp. 153–173.
5. Kvassay, M., Levashenko, V., Zaitseva, E. Analysis of minimal cut and path sets based on direct partial Boolean derivatives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2016, vol. 230, no. 2, pp. 147–161.
6. Schneeweiss, W.G. A short Boolean derivation of mean failure frequency for any (also non-coherent) system, *Reliability and Engineering System Safety*, 2009, vol. 94, no. 8, pp. 1363–1367.
7. Zhang, L., Xing, L., Liu, A., Mao, K. Multivalued Decision Diagrams-Based Trust Level Analysis for Social Networks, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, no. 12, pp. 180620-180629.
8. Zhang, S., Sun, S., Si, S., Wang, P. A decision diagram based reliability evaluation method for multiple phased-mission systems. *Ekspluatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 485-492.
9. Xin, S., Yan, C., Xingyou, Z., Chuanzhi, W. A novel multi-microgrids system reliability assessment algorithm using parallel computing. *Energy Internet and Energy System Integration: Proceedings of the 2017 IEEE Conference*, Beijing, China, 2017, pp. 1-6.
10. Quan, Z. Wang, Z.-J., Ye, T., Guo, S. Task Scheduling for Energy Consumption Constrained Parallel Applications on Heterogeneous Computing Systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2019, vol. 45, no. 12, pp. 1-8.
11. Kukharev, G. Shmerko, V., Zaitseva, E. *Multiple-Valued Data Processing Algorithms and Systolic Processors*. Minsk, Nauka and Technika Publ., 1990. 320 p.
12. Zaitseva, E., Levashenko, V. Reliability analysis of Multi-State System and Multiple-Valued Logic. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2017, vol. 34, no. 6, pp. 862-878.
13. Beeson, S., Andrews, J. D. Importance measure for non-coherent-system analysis. *IEEE Transaction on Reliability*, 2003, vol. 52, no. 3, pp. 301-310.
14. Steinbach, B., Posthoff, C. *Boolean Differential Calculus*. San Rafael, Morgan & Claypool Publ., 2018. 720 p.
15. Posthoff, C., Steinbach, B. *Logic Functions and Equations: Binary Models for Computer Science*. Second ed., Springer Publ., 2019. 507 p.
16. Moret, B. M. E., Thomason, M. G. Boolean Difference Techniques for Time-Sequence and Common-Cause Analysis of Fault-Trees. *IEEE Transaction on Reliability*, 1984, vol. R-33, pp. 399-405.
17. Birnbaum Z. W. On the Importance of Different Components in a Multicomponent System. *Multivariate Analysis II*. New York, Academic Press Publ., 1969, pp. 581–922.

Received (Надійшла) 04.11.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.12.2019

**Матричні процедури
для обчислення важливих оцінок компонентів системи**

П. Седлячек, А. Форгач, О. Зайцева

Анотація. Надійність/доступність системи є складним багатограним поняттям, яка оцінюється на основі численних показників і індексів. Існують різні методи розрахунку цих показників в аналізі надійності. Одними з найбільш часто використовуваних показників є показниками оцінки важливості компонентів системи, які дозволяють оцінити вплив одного або декількох компонентів системи на її надійність/доступність. Сьогодні використовуються міри важливості, щоб врахувати різні аспекти впливу елементів системи на її відмову або працездатність. Аналіз важливості елементів використовується при проектуванні, діагностиці та оптимізації системи. У даній статті розроблені нові алгоритми розрахунку деяких оцінок важливості компонентів системи на основі матричних процедур. Метою даної роботи є розробка нового алгоритму для розрахунку показників важливості системи на основі матричних процедур, які можуть бути перетворені в паралельні процедури/алгоритми. Ці алгоритми розроблені на основі застосування логічного диференціального обчислення булевої логіки для аналізу важливості системи. Застосування паралельних алгоритмів в аналізі важливості дозволяє оцінювати надійність системи великої розмірності. Специфічною особливістю запропонованих матричних процедур для розрахунку показників важливості є використання структурної функції для математичного подання досліджуваної системи. Ця функція визначає однозначне співвідношення для всіх можливих поєднань станів компонентів системи і надійністю/доступністю системи. Структурна функція в цьому випадку визначається як вектор істинності, який використовується в матричних перетвореннях. Вектор істинності булевої функції являє собою стовпець таблиці істинності для значень змінних упорядкованих в лексикографічному порядку. Будь-яка структурна функція системи може бути однозначно представлена вектором істинності, який складається з 2^n елементів.

Ключові слова: оцінки важливості компонентів; структурна функція; логічне диференціальне числення; логічні спрямовані похідні.

О. В. Барабаш, Є. М. Галахов

Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧАСУ ПРОВЕДЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО АУДИТУ ЗА УМОВИ ЕЛАСТИЧНОСТІ ТА ЧУТЛИВОСТІ ФУНКЦІЇ ІНТЕНСИВНОСТІ КІБЕРАТАК

Анотація. В статті представлено дослідження, що направлені на встановлення оптимального часу проведення спеціального аудиту для покращення рівня кіберзахисту і надання пріоритетних та перевірених заходів для зменшення ризику виникнення кібер-інциденту. Проаналізовано часові ряди інтенсивності кібератак підприємства з проведенням аналітичного вирівнювання часового ряду функції інтенсивності кібератак за допомогою логістичної кривої. За знайденим інтервалом еластичності аналітичної функції інтенсивності кібератак на підприємство, що задовольняє нелінійному диференціальному рівнянню Бернуллі, проведено аналіз часових рядів кібератак на системі підприємства за однакові часові періоди, що попадають у часовий проміжок від кінця планового аудиту до початку наступного. За допомогою p -перетворення до функції інтенсивності кібератак на підприємство та, враховуючи безрозмірність змінних, обчислено чутливість безрозмірної функції інтенсивності кібератак від параметра p за встановлений часовий період за умови проведення попередньої фільтрації часового ряду за трьома точками. Визначено оптимальний час проведення спеціального аудиту після проведення планового аудиту.

Ключові слова: часовий ряд, інтенсивність кібератак, еластичність, рівняння Бернуллі, p -перетворення, фільтрація, спеціальний аудит.

Вступ

На сьогоднішній день інформаційно-телекомунікаційні системи розглядаються як мережі із змінюваною структурою, мережі, які можуть самоналаштуватися, реструктуруватися та самостійно відновлювати функціонування при впливі внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих факторів. Зміна структури здійснюється при підключенні (або відключенні) кожного абонентського пристрою до мережі. Кожного разу, коли новий пристрій підключається до мережі і виходить в Інтернет або з'єднується з іншими пристроями, зростає інтенсивність кібератак. Швидке зростання за останнє десятиліття Інтернету речей, хмарних технологій, великих даних та оцифрування промисловості супроводжується зростанням інтенсивності кібератак. Різноманітність кібератак ускладнює захист підприємства у контексті його інформаційної безпеки. Небезпечне програмне забезпечення, що призначено для нанесення шкоди пристроям або мережам включає віруси, трояни, черв'яки, рекламне та шпигунське програмне забезпечення. Найбільш розповсюдженими стали розподілені атаки відмови в обслуговуванні (DDoS), які роблять ресурси недоступними, переполюючи їх більшою кількістю запитів, ніж вони можуть впоратися. Також у контексті соціальної інженерії користувачі (фрілансери) мимоволі розголошують конфіденційну інформацію. Найбільш небезпечні типи загроз – це вдосконалені постійні загрози (APT), що займаються тривалим моніторингом та руйнівними цілями. За умови зростання фінансового впливу кібератак на функціонування підприємств, загострюється невідповідність між витратами на кібернапад та витратами на попередження, аудит та відшкодування. Наприклад, DDoS-атака може кош-

тувати незначну вартість. Але втрати, що понесені цільовим бізнесом, у тому числі пошкодження репутації, значно вищі. Управління кібербезпекою можна покращити, якщо підвищити здатність підприємства реагувати на кібератаки та інциденти. В той же час запобігти всім атакам неможливо. Тому швидке виявлення й реагування та захист критичної інфраструктури і функцій разом з потужним обміном інформацією є ключовими проблемами, які потрібно вирішувати. Одним із аспектів вирішення цієї проблеми є вчасне проведення аудитів, які не обмежуються лише плановою перевіркою, а і дають розуміння й прийняття відповідних заходів щодо запобігання кібератакам. Після завершення аудитів надається вичерпний звіт про результати досліджень, який визначає сфери, які потрібно виправити для підвищення рівня безпеки. Звіт аудиту підприємства використовується для виявлення областей у корпоративному середовищі, які можуть бути поліпшені шляхом здійснення контролю кібербезпеки. Результати цього звіту містять корисні приклади, рекомендації та додаток посилань. Загалом у звіті є базовий рівень, за допомогою якого можна покращити рівень безпеки, використовуючи відчутні кроки та унеможливаючи подальший ризик.

Постановка завдання. Зі збільшенням швидкості та точності обробки даних, багаторазовим підключенням, швидкою передачею даних на великі відстані, розробка та узагальнення автоматичної обробки принесла багато нових вразливостей, що обумовлює нові категорії ризиків інформаційної безпеки підприємства. Ризики кібератак при аудиті пов'язані з управлінням ризиками безпеки інформаційних систем. Аудит та контроль інформаційних систем підприємства має на меті повідомляти, які дії потрібно вжити, щоб покращити рівень кіберзахис-

ту, а також надає пріоритетні та перевірені заходи, щоб зменшити ризик виникнення кібер-інциденту. Тому необхідно проаналізувати основні типи кібератак та провести дослідження часових рядів їх інтенсивності для встановлення оптимального часу проведення спеціального аудиту між плановими аудитом і контролем. Плановий аудит безпеки підприємства – це аудит ІТ-операцій з точки зору кібербезпеки. Однак, інформаційна система підприємства може відповідати всім вимогам нормативних документів і все-таки не бути захищеною.

Багато підприємств зосереджуються на технічних аспектах кібербезпеки та ігнорують політику, процеси та процедури. Зауважимо, що спеціальні аудити також є важливими елементами кібернавчання, які пропонуючи можливості підвищити готовність шляхом тестування, дають відповіді на реальні сценарії та побудову відносин суб'єктів. Отже, підвищення обізнаності має важливе значення для створення ефективної кіберстійкості. Таким чином, комплексний аудит кібербезпеки, що включає не тільки планові, а і спеціальні аудити, допоможе підприємству заздалегідь шукати потенційні недоліки безпеки у системі та уникнути великих бізнес-збитків, що забезпечить максимальне зниження ризику та дозволить своєчасно реагувати на загрози безпеці.

Аналіз останніх публікацій і досліджень

Процес аудиту та перевірки кібербезпеки сприяє підвищенню рівня кібербезпеки [1]. Внутрішні аудитори та фахівці управління ризиками відіграють ключову роль в управлінні підприємством. Менеджмент забезпечує існування та ефективне функціонування системи контролю за рівнем кібербезпеки [2]. Оцінки ризику та їх складові (ІТ-інфраструктура, включаючи апаратне програмне забезпечення, центри обробки даних, мережі, сервери) постійно змінюються, що вимагає впровадження ефективних заходів забезпечення рівня кібербезпеки. Аудит допомагає підприємствам вирішувати проблеми управління кіберзагрозами, забезпечуючи об'єктивну оцінку контролю та надання рекомендацій щодо їх вдосконалення, а також надання допомоги вищому керівництву з точки зору розуміння та реагування на кіберризик [3]. Аудит інформаційної безпеки – це повна оцінка безпеки компанії, яка є невід'ємною частиною послуг інформаційної безпеки. Аудит інформаційної безпеки включає: аудит бізнес-структури, процесів, аудит технічної безпеки (оцінка вразливості та тестування на проникнення) [2, 3].

Процесу прогнозування часових рядів присвячені наукові праці [4, 5, 6, 7]. При цьому, застосовуються методи, засновані на авторегресивних моделях, що використовують зовнішні часові ряди в задачі прогнозування [6, 8]. Аналіз авторегресивних моделей перед застосуванням полягає у перегляді спостережень за часовими рядами, особливо за їх властивостями стаціонарності та періодичності. Ілюстрація прогнозування кібератак

трація прогнозування кібератак представлена на рис. 1 [8]. Тут припускається, що основні дані емпіричних кібератак, подаються для налагоджування моделей прогнозування разом із зовнішніми сигналами. Прогнози робляться для подій, що відбудуться протягом майбутнього періоду часу.

Метод оцінювання прогнозування часових рядів, що засновано на нейронних мережах, представлено у роботі [9].

Метод, що ідентифікує сигнали з Інтернет-джерел даних, які послідовно покращують прогнози кібератак, розглянуто у [10]. Огляд класичних підходів, заснованих на авторегресивних моделях та новітні підходи, які використовують нейронні мережі для прогнозування, беруть за основу дослідники в роботі [11] з метою прогнозування кібератак за допомогою машинного навчання. Таким чином дослідження часових рядів інтенсивності кібератак з метою аналізу та визначення ефективного часового інтервалу проведення спеціальних аудитів потребують нових методичних підходів.

Основна частина

Аналітична функція інтенсивність кібератак $I_K(t)$ на підприємство задовольняє нелінійному диференціальному рівнянню Бернуллі:

$$\begin{aligned} \dot{I}_K(t) - \zeta \cdot I_K(t) &= -\zeta \cdot (I_K(t)_{Max})^{-1} \cdot I_K^2(t), \\ I_K(0) &= I_{K_0}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $I_K(t)_{Max}$ – максимально можливий рівень функції інтенсивності кібератак; $I_K(0) = I_{K_0}$ – початковий рівень функції інтенсивності кібератак після проведення планового аудиту; ζ – рівень корегування загроз кібератак завдяки звичайного аудиту.

$$I_K(t) = \frac{I_K(t)_{Max}}{1 + \left(\frac{I_K(t)_{Max} - I_{K_0}}{I_{K_0}} \right) \cdot e^{-\zeta t}}. \quad (2)$$

Інтервал еластичності функції інтенсивності кібератак знаходимо за формулою $El_t = \frac{t \cdot \dot{I}_K(t)}{I_K(t)}$ у вигляді нерівності, що розв'язується чисельно:

$$\zeta \cdot \frac{I_K(t)_{Max} - I_{K_0}}{I_{K_0}} \cdot t - \frac{I_K(t)_{Max} - I_{K_0}}{I_{K_0}} > e^{\zeta t}. \quad (3)$$

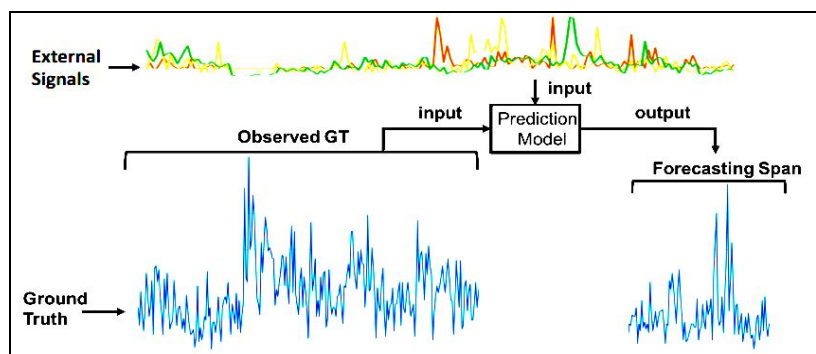


Рис. 1. Ілюстрація прогнозування кібератак

Для зручності викладок введемо заміни:

$$\begin{aligned} I_K(t) &= y(t), \quad I_K(t)_{Max} = k, \\ -\zeta &= a, \quad (I_K(t)_{Max} - I_{K_0})/I_{K_0} = b. \end{aligned} \quad (4)$$

Тоді функцію (2) перепишемо у вигляді:

$$y(t) = \frac{k}{1 + b \cdot e^{at}} \Rightarrow \frac{k}{y(t)} - 1 = b \cdot e^{at}, \quad (5)$$

Прологарифмуємо (5), маємо:

$$\ln(k/y(t) - 1) = \ln b + at.$$

Введемо нове позначення:

$$B(t) = \ln(k/y(t) - 1).$$

Тоді запишемо систему нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} \sum B(t) = n \ln b + a \sum t; \\ \sum B(t) \cdot t = \ln b \sum t + a \sum t^2. \end{cases} \quad (6)$$

Нехай статистична регресійна апроксимація, як розв'язок системи (5) має вигляд:

$$\hat{y}(t) = \frac{k}{1 + b \cdot e^{at}}. \quad (7)$$

Знаходимо різницю обернених сусідніх значень

$$\frac{1}{\hat{y}(t+1)} = \frac{(e^a - 1)}{k} + e^a \cdot \frac{1}{\hat{y}(t)},$$

Оцінимо параметри $(e^a - 1)/k$ та e^a . Знаходимо мінімум функції:

$$\min \left\{ \sum (1/y(t) - 1/\hat{y}(t))^2 \right\}, \quad (8)$$

Запишемо систему нормальних рівнянь у такому вигляді:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)} = (n-1) \cdot \frac{(1-e^a)}{k} + e^a \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)}; \\ \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)} \cdot \frac{1}{y(t)} = \\ = \frac{(1-e^a)}{k} \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)} + e^a \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)^2}, \end{cases} \quad (9)$$

Розв'язок цієї системи має вигляд:

$$\begin{aligned} e^a &= \frac{(n-2)}{(n-1) \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)^2} - \left(\sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)} \right)^2}, \\ \frac{(1-e^a)}{k} &= \frac{\sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)} \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)} - \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)} \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)} \cdot \frac{1}{y(t)}}{(n-1) \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)^2} - \left(\sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)} \right)^2} = A, \end{aligned}$$

$$\text{звідки} \quad k = (1 - e^a) / A. \quad (10)$$

Таким чином, після оцінки параметрів k і a рівняння (7), перейдемо до оцінки параметра b . Для цього перетворимо рівняння (7):

$$k/\hat{y}(t) - 1 = b \cdot e^{at},$$

після логарифмування, дістанемо:

$$\frac{\sum_{t=1}^n \ln b - a \cdot \sum_{t=1}^n \frac{n(n+1)}{2}}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n \ln \left(\frac{k}{\hat{y}(t)} - 1 \right)}{n}.$$

Зробимо припущення, що

$$\sum_{t=1}^n \ln \left(\frac{k}{\hat{y}(t)} - 1 \right) = \sum_{t=1}^n \ln \left(\frac{k}{y(t)} - 1 \right), \quad (11)$$

Тоді маємо:

$$\ln b = \frac{-a \cdot (n+1)}{2} + \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \ln \left(\frac{k}{y(t)} - 1 \right). \quad (12)$$

Таким чином, керуючись формулами (8) – (12) можна провести аналітичне вирівнювання часового ряду для функції інтенсивності кібератак за допомогою логістичної кривої. Розглянемо часові ряди кібератак на систему підприємства за однакові часові періоди з липня по листопад (1.07-30.09) 2017-2019 років, що попадає у часовий проміжок від кінця третього аудиту до початку четвертого (рис. 2). Проведемо фільтрацію часових рядів за трьома точками (пунктирні лінії на рис. 2).

Отже, для системи (9) знаходимо значення параметрів за наступним алгоритмом:

1. Обчислення:

$$\sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)}; \quad \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)^2}; \quad \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)}; \quad \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)} \cdot \frac{1}{y(t)}.$$

2. Знаходження значення:

$$e^a = \frac{(n-2)}{(n-1) \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)^2} - \left(\sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)} \right)^2}.$$

3. Логарифмування:

$$\begin{aligned} A &= \\ &= \frac{\sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)} \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)} - \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)} \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t+1)} \cdot \frac{1}{y(t)}}{(n-1) \cdot \sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)^2} - \left(\sum_{t=1}^{n-1} \frac{1}{y(t)} \right)^2}. \end{aligned}$$

4. Знаходження значення:

$$k = (1 - e^a) / A.$$

5. Знаходження значення:

$$\ln b = \frac{-a \cdot (n+1)}{2} + \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \ln \left(\frac{k}{y(t)} - 1 \right).$$

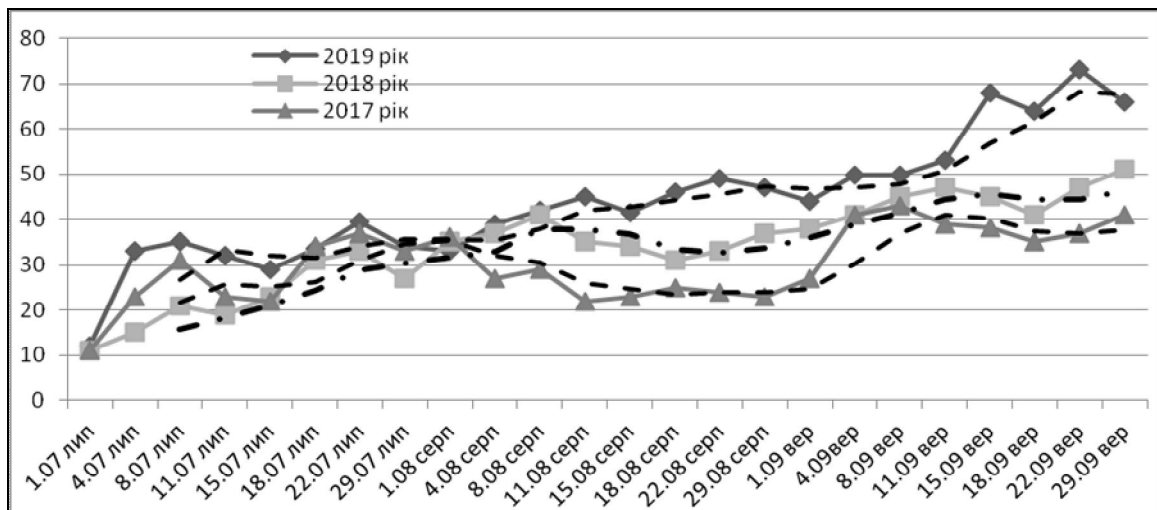


Рис. 2. Часові ряди кібератак на систему підприємства 1.07-30.09 2017-2019 року з проведеною фільтрацією за трьома точками

6. Піднесення до степеня числа e :

$$b = \text{Exp} \left[\frac{-a \cdot (n+1)}{2} + \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \ln \left(\frac{k}{y(t)} - 1 \right) \right].$$

$$\hat{y}(t) = k / (1 + b \cdot e^{at}).$$

7. Аналітичне вирівнювання часового ряду логістичної регресії:

У табл. 1 представлено аналітичне вирівнювання часових рядів кібератак на систему підприємства у період 1.07-30.09 2017-2019 року за умови попередньої фільтрації за трьома точками.

Таблиця 1. Аналітичне вирівнювання часових періодів кібератак на систему підприємства у період 1.07-30.09 2017-2019 року

Часовий період	Логістична модель	Графік аналітичного вирівнювання інтенсивності кібератак
1.07-30.09 2017 р.	$I_K(t) = \frac{253,47}{1 + 9,41 \cdot e^{-1,02t}}$	
1.07-30.09 2018 р.	$I_K(t) = \frac{241,35}{1 + 8,07 \cdot e^{-1,31t}}$	
1.07-30.09 2019 р.	$I_K(t) = \frac{261,23}{1 + 8,77e^{-1,19t}}$	

Застосовуючи p -перетворення до функції інтенсивності кібератак $I_K(t)$ на підприємство, для розв'язку рівняння (1) у вигляді:

$$I_K(t) \rightarrow i_K(t)^{p-1}, p \in (0,1) \cup (1, \infty),$$

розв'язок рівняння (1) перетворюється до безрозмірного вигляду:

$$i_K^*(t) = \left(1 + \left(\frac{1 - i_K^*(0)}{i_K^*(0)} \right) \cdot e^{-\zeta t^*} \right)^{-1/(p-1)},$$

$$i_K^*(t) = \frac{i_K(t)}{i_K(t)_{Max}}, \quad t^* = \frac{t}{T} \quad (13)$$

де T – період між плановими аудитами.

Це дає можливість знаходити чутливість безрозмірної функції інтенсивності кібератак від параметра p .

На рис. 3 представлено чутливість функції інтенсивності кібератак від параметра $p \in [1,9; 2,15]$ за період 1.07-30.09 2019 року за умови проведення фільтрації часового ряду за трьома точками. Мітками на кривих (пунктирні лінії) позначено точки перегину.

На графіку вертикальними лініями окреслено часовий інтервал еластичності функції інтенсивності кібератак, що визначає ефективний час проведення спеціального аудиту (0,64; 0,93) або, починаючи з 57-го дня після проведення планового аудиту по 83-й день необхідно проводити спеціальний аудит.

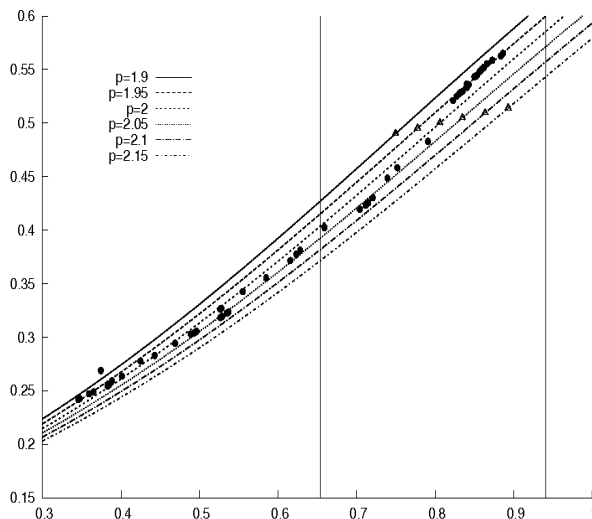


Рис. 3. Чутливість безрозмірної функції інтенсивності кібератак від параметра за період 1.07-30.09 2019 року за умови проведення фільтрації часового ряду за трьома точками

Висновки

За знайденим інтервалом еластичності аналітичної функції інтенсивності кібератак на підприємство, що задовольняє нелінійному диференціальному рівнянню Бернуллі, і проведеним аналітичним вирівнюванням часового ряду функції інтенсивності кібератак за допомогою логістичної кривої (за умови попередньої фільтрації часових рядів за трьома точками), проведено аналіз часових рядів кібератак на систему підприємства за однакові часові періоди 2017-2019 років, що попадають у часовий проміжок від кінця планового аудиту до початку наступного. Застосовуючи p -перетворення до функції інтенсивності кібератак на підприємство, враховуючи безрозмірність змінних, представлено чутливість безрозмірної функції інтенсивності кібератак від параметра p за встановлений часовий період року за умови проведення попередньої фільтрації часового ряду за трьома точками. Визначено оптимальний час проведення спеціального аудиту, починаючи з 57-го дня після проведення планового аудиту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шуклін Г. В., Барабаш О. В. Метод побудови стабілізаційної функції керування кібербезпекою на основі математичної моделі коливальності. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. Київ. 2018. № 2 (59). С. 110–116.
2. S. Zhang, X. Ou and D. Caragea (2015), "Predicting cyber risks through national vulnerability database". *Information Security Journal: A Global Perspective*, Vol. 24, No. 4-6, pp. 194 – 206.
3. H. Park, S.-O. D. Jung, H. Lee and H. P. In (2012) "Cyber Weather Forecasting: Forecasting Unknown Internet Worms Using Randomness Analysis", *IFIP International Information Security Conference*. Springer, 2012, pp. 376 – 387.
4. C. M. Cheung, P. Goyal, V. K. Prasanna and A. S. Tehrani (2017) "Oreonet: Deep convolutional network for oil reservoir optimization". *Big Data (Big Data)*, 2017 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 1277 – 1282.
5. G. E. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel and G. M. Ljung (2015), *Time series analysis: forecasting and control*, Published by John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 712 p.
6. J. Viinikka, H. Debar, L. Me, A. Lehtikoinen and M. Tarvainen (2009) "Processing intrusion detection alert aggregates with time series modeling", *Information Fusion*, Vol. 10, No. 4, pp. 312 – 324.
7. D. Neil, M. Pfeiffer and S.-C. Liu (2016) "Phased lstm: Accelerating recurrent network training for long or event-based sequences". *Neural Information Processing Systems*, pp. 3882 – 3890.
8. Z. Wang, P. Chakraborty, S. R. Mekaru, J. S. Brownstein, J. Ye and N. Ramakrishnan (2015), "Dynamic poisson autoregression for influenza-like-illness case count prediction", *KDD '15*. New York, NY, USA: ACM, pp. 1285 – 1294.
9. S. Yang, H. Du, J. Holsopple and M. Sudit (2014) "Attack Projection". In *Cyber Defense and Situational Awareness*, A. Kott, C. Wang, and R.F. Erbacher (Eds.). Springer International Publishing, Cham, pp. 239 – 261.
10. E. Gandotra, D. Bansal and S. Sofat (2015) "Computational Techniques for Predicting Cyber Threats". *Proceedings Intelligent Computing, Communication and Devices (AISC, Vol. 308)* ed J. Kacprzyk (New Delhi: Springer) pp. 247 – 253.
11. B. Munkhdorj and S. Yuji (2017) "Cyber attack prediction using social data analysis". *Journal of High Speed Networks*, No. 23 (2), pp. 109 – 135.

Received (Надійшла) 29.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.11.2019

Attitude optimal hours performed by the special audit for the mind of elasticity and flexibility function intensity cyberattacks

O. Barabash, Ye. Halakhov

Abstract. Cybersecurity management can be improved by enhancing the enterprise's ability to respond to cyberattacks and incidents. At the same time, it is impossible to prevent all attacks. Therefore, the rapid identification and response and protection of critical infrastructure and functions together with powerful information sharing are key issues that need to be addressed. One aspect of addressing this is to conduct timely audits, which are not only limited to scheduled scrutiny, but also provide insight into and take appropriate steps to prevent cyberattacks. The article presents studies aimed at determining the optimal time for conducting a special audit to improve the level of cyber defense and providing priority verified measures to reduce the risk of a cyber-incident. The time series of the cyber-attack intensity of the enterprise are analyzed with analytical alignment of the time series of the cyber-attack intensity function using a logistic curve. Based on the found elasticity intervals of the analytic function of the intensity of cyber-attacks on the enterprise that satisfy the non-linear Bernoulli differential equation, the analysis of the time series of cyber-attacks on the enterprise system for the same time periods that fall in the time period from the end of the planned audit to the beginning of the next. Using the p -transformation to the function of the intensity of cyber-attacks at the enterprise, and taking into account the dimensionlessness of the variables, the sensitivity of the dimensionless function of the intensity of cyber-attacks from the parameter p for a specified time period is calculated under the condition of preliminary filtering of the time series by three points. The optimal time for a special audit after a scheduled audit has been determined.

Keywords: time series, cyber-attack intensity, elasticity, Bernoulli equation, p -transformation, filtering, special audit.

О. В. Коваленко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕСТУВАННЯ ВРАЗЛИВОСТІ ДО SQL ІН'ЄКЦІЙ

Анотація. В роботі представлені результати дослідження та алгоритми тестування на вразливість до однієї з найбільш поширених видів атак на Web-застосунки SQL ін'єкції. На основі аналізу методології тестування уразливості Web-застосунків до DOM XSS і матеріалів Open Web Application Security Project, розроблений алгоритм аналізу уразливості Web-застосунків до SQL ін'єкцій. Відмінною особливістю даного алгоритму є облік тільки уразливості, яка є в GET параметрах URL і використовує тільки сліпий метод ін'єкції SQL коду, що використовує особливість використання булевих операторів в SQL запитих (Boolean blind SQL injection). На підставі поданого алгоритму розроблена GERT-модель технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій. В розробленій моделі вузли графа інтерпретуються станами комп'ютерної системи в процесі тестування уразливості до SQL ін'єкцій, а гілки графа – ймовірно-тимчасовими характеристиками переходів між станами. Таким чином, на основі експоненційної GERT-мережі розроблено математичну модель технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій, яка відрізняється від відомих, вдосконаленим способом визначення відстані між результатами ін'єкції. Використання в запропонованому способі критерію Джаро-Вінклера, для порівняння результатів ін'єкції SQL коду і введення порогового значення дозволить підвищити точність результатів тестування безпеки програмного забезпечення. Розглянуто приклад атаки SQL ін'єкцій, суть яких – впровадження в дані (передані через GET, POST запити або значення Cookie) довільного SQL коду. Побудовано графіки, зовнішній вигляд кривих яких дає підстави припустити, що не всі знайдені рішення застосовні при математичному та імітаційному моделюванні в якості вхідних даних. У той же час зовнішній вигляд графіків, отриманих для інших значень дає підстави припустити, що випадкова величина часу виконання технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій відповідає гамма-розподілу (близьке до експоненційного). Перевірка цієї гіпотези проведена за критерієм χ^2 Пірсона.

Ключові слова: вразливості до SQL ін'єкцій, GERT-мережі, вразливості безпеки, алгоритми тестування, математична модель тестування.

Вступ

В даний час великий попит на Web-застосунки і Web-послуги обумовлює великий інтерес зловмисників до їх можливих вразливостей. При цьому основні загрози в напрямку серверних компонентів трансформуються в атаки, спрямовані проти звичайних користувачів. Проведений аналіз матеріалів Open Web Application Security Project (OWASP TOP-10) [1] показав, що одним з найбільш небезпечних видів атак (вразливостей) є міжсайтовий скриптинг – XSS (Cross Site Scripting).

Аналіз літератури [1-8] показав, що міжсайтовий скриптинг – це помилка валідації призначених для користувача даних, яка дозволяє передати JavaScript код на виконання в браузер користувача. Атаки такого роду часто також називають HTML-ін'єкціями, адже механізм їх впровадження дуже схожий з SQL-ін'єкціями, але на відміну від останніх, впроваджуваний код виповнюється в браузері користувача. У ряді Інтернет-статей докладно описані основні механізми виникнення подібного роду загроз, а також шляхи можливого блокування. Однак, щоб ідентифікувати ці загрози і можливі наслідки їх поширення в процесі безпечного управління IT-проектами, а також запропонувати оптимальні шляхи вирішення цієї проблеми, існує необхідність математичної формалізації процесу їх ініціалізації і поширення.

Особливо актуальним завданням в цьому напрямку є моделювання DOM (Document Object Model) XSS уразливості. Для математичної формалізації алгоритму аналізу DOM XSS уразливості скористаємося основними положеннями мережевого

GERT-моделювання, докладно описаними в роботах [2-5]. Проведені дослідження [3, 5] показали, що на основі аналізу методології тестування уразливості Web-застосунків до DOM XSS і матеріалів Open Web Application Security Project [6, 7], можна розробити алгоритм аналізу уразливості Web-застосунків до SQL ін'єкцій. Відмінною особливістю даного алгоритму є облік тільки уразливості, яка є в GET параметрах HTTP запиту тобто передається серверу за допомогою посилання Uniform Resource Locator і використовує тільки сліпий метод ін'єкції SQL коду, що використовує особливість використання булевих операторів в SQL запитих (Boolean blind SQL injection) [7].

Мета роботи: розробити математичну модель технології тестування вразливості до SQL ін'єкцій, яка відрізняється від відомих, удосконаленим способом визначення відстані між результатами ін'єкції.

Алгоритм аналізу уразливості до SQL ін'єкцій

Відповідно до алгоритму аналізу уразливості Web-застосунки до SQL ін'єкцій, його етапи можна описати таким чином:

1. З введеного URL посилання виходить список GET параметрів.

2. Виконується перевірка стабільності Web-сторінки. Для цього виконується два послідовних запити в Web-сторінки і обчислюється відстань між вмістом HTML коду сторінки за допомогою критерію Джаро-Вінклера [8]. Якщо значення критерію менше певного порогового значення, виконувати подальший аналіз неможливо.

3. У параметр GET запиту виконується ін'єкція SQL коду, який не змінює результат запиту до бази даних і зберігається результуючий HTML код.

4. У параметрі GET запиту виконується ін'єкція SQL коду, який змінює результат запиту до бази даних, призводить або до отримання повного набору даних з таблиці, або до відсутності результату, після чого зберігається результуючий HTML код.

5. За допомогою критерію Джаро-Вінклера виконується порівняння результатів ін'єкції SQL коду. Якщо значення критерію менше певного порогового значення, то в даному GET параметрі є можлива вразливість до SQL ін'єкції.

6. Кроки 2-5 повторюються для всіх параметрів GET запиту наданого URL.

На підставі поданого алгоритму розробимо GERT-модель технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій.

GERT-модель технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій

Побудуємо, відповідно до представленого описом мережеву GERT-модель технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій. Графічне зображення GERT-моделі представлено на рис. 1.

У представленій мережі вузли графа інтерпретуються станами комп'ютерної системи в процесі тестування уразливості до SQL ін'єкцій, а гілки графа – ймовірно-тимчасовими характеристиками переходів між станами.

Зокрема гілка (1,2) характеризує час отримання і аналізу GET-параметрів з введеного URL посилання. Гілка (2,3) відображає час відправлення первин-

них і вторинних запитів в Web-сторінки. Гілка (3,4) задає випадкове час порівняння сторінок (час обчислення відстані між вмістом HTML коду сторінки за допомогою критерію Джаро-Вінклера). Гілка (4,5) характеризує час, за яке виконується ін'єкція SQL коду, який не змінює результат запиту до бази даних, а також який змінює результат запиту до бази даних відповідно. Далі гілка (5,6) характеризує час порівняння результатів ін'єкції SQL коду. Гілка (4,2) характеризує тимчасові характеристики повернення системи в початковий стан, коли значення критерію Джаро-Вінклера менше певного порогового значення, в той же час гілка (6,2) відображає тимчасові характеристики переходу до нової перевірки в разі якщо значення критерію Джаро-Вінклера більше певного порогового значення. Характеристики гілок моделі наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристики гілок моделі технології тестування вразливості до SQL ін'єкцій

№ п/п	Гілка	W-функція	Ймовірність	Функція що походить від моментів
1	(1,2)	W_{12}	p_1	$\lambda_1 / (\lambda_1 - s)$
2	(2,3)	W_{23}	p_2	$\lambda_2 / (\lambda_2 - s)$
3	(3,4)	W_{34}	p_3	$\lambda_3 / (\lambda_3 - s)$
4	(4,5)	W_{45}	p_4	$\lambda_4 / (\lambda_4 - s)$
5	(5,6)	W_{56}	p_5	$\lambda_5 / (\lambda_5 - s)$
6	(4,2)	W_{42}	$1 - p_4$	$\lambda_5 / (\lambda_5 - s)$
7	(6,2)	W_{62}	p_6	$\lambda_6 / (\lambda_6 - s)$

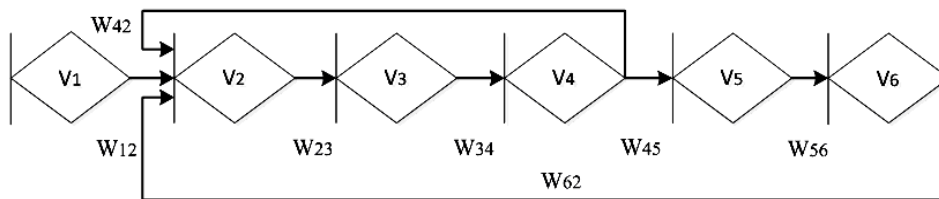


Рис. 1. GERT-модель технології тестування вразливості до SQL ін'єкцій

Еквівалентна W-функція часу виконання технології тестування вразливості до SQL ін'єкцій дорівнює:

$$W_E(s) = W_{12}W_{23}W_{34}W_{45}W_{56} / (1 - W_{12}W_{23}W_{34}W_{42} - W_{12}W_{23}W_{34}W_{45}W_{56}W_{62}) = \frac{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 (\lambda_3 - s)(\lambda_5 - s)(\lambda_6 - s)}{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)(\lambda_3 - s)^2 (\lambda_4 - s)(\lambda_5 - s)(\lambda_6 - s) - (p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \times (q_1 \lambda_5 (\lambda_3 \lambda_4 - \lambda_4 s - \lambda_3 s - s^2)) (\lambda_6 - s) - p_4 p_5 p_6 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_6 (\lambda_5 - s))}, \quad (1)$$

де $1 - p_4 = q_1$.

Аналогічно алгоритму аналізу DOM XSS вразливості [2, 5] виконуючи комплексне перетворення $z = -s$, отримаємо

$$\Phi(z) = \frac{vz^2 + bz + k}{(z^7 + rz^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m)}, \quad (2)$$

де $v = -p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4$,

$$b = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 (\lambda_5 + \lambda_6),$$

$$k = -p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6,$$

$$r = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 - 2\lambda_3 - \lambda_6,$$

$$c = \begin{pmatrix} \lambda_1 \lambda_4 + \lambda_2 \lambda_4 + \lambda_1 \lambda_5 + \lambda_2 \lambda_5 + \lambda_3^2 + \\ + 2\lambda_3 \lambda_6 - \lambda_4 \lambda_6 - \lambda_5 \lambda_6 - \lambda_1 \lambda_6 - \lambda_4 \lambda_5 - \\ - 2\lambda_3 \lambda_4 - 2\lambda_3 \lambda_5 - \lambda_1 \lambda_2 - 2\lambda_1 \lambda_3 - 2\lambda_2 \lambda_3 \end{pmatrix},$$

$$d = -\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_5\lambda_6 \times \left(\frac{1}{\lambda_2\lambda_3\lambda_5} + \frac{1}{\lambda_1\lambda_3\lambda_5} + \frac{1}{\lambda_2\lambda_3\lambda_4} + \frac{1}{\lambda_1\lambda_3\lambda_4} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_2\lambda_4\lambda_5} + \frac{1}{\lambda_2\lambda_3\lambda_6} + \frac{1}{\lambda_1\lambda_3\lambda_6} + \frac{1}{\lambda_3\lambda_5\lambda_6} + \frac{2}{\lambda_2\lambda_5\lambda_6} + \frac{2}{\lambda_1\lambda_5\lambda_6} + \frac{1}{\lambda_3\lambda_4\lambda_6} + \frac{2}{\lambda_2\lambda_4\lambda_6} + \frac{2}{\lambda_1\lambda_4\lambda_6} - \frac{1}{\lambda_1\lambda_2\lambda_3} - \frac{2}{\lambda_1\lambda_2\lambda_5} - \frac{2}{\lambda_1\lambda_2\lambda_4} - \frac{1}{\lambda_3\lambda_4\lambda_5} - \frac{2}{\lambda_2\lambda_4\lambda_5} - \frac{2}{\lambda_1\lambda_2\lambda_6} - \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_2\lambda_5\lambda_6} - \frac{\lambda_3}{\lambda_3} - \frac{2}{\lambda_3} - \frac{\lambda_3}{\lambda_3} \right)$$

$$g = \left(\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_5\lambda_6 \times \left(\frac{2}{\lambda_1\lambda_2} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_2\lambda_5} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_2\lambda_4} + \frac{2}{\lambda_4\lambda_5} + \frac{\lambda_3}{\lambda_2\lambda_4\lambda_5} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_4\lambda_5} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_2\lambda_6} - \frac{1}{\lambda_2\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_3\lambda_5} - \frac{2}{\lambda_2\lambda_5} - \frac{2}{\lambda_1\lambda_5} - \frac{1}{\lambda_3\lambda_4} - \frac{2}{\lambda_2\lambda_4} - \frac{2}{\lambda_1\lambda_4} - \frac{1}{\lambda_3\lambda_6} - \frac{2}{\lambda_2\lambda_6} - \frac{1}{\lambda_1\lambda_6} - \frac{\lambda_5\lambda_6}{\lambda_3} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2\lambda_5\lambda_6} - \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_5\lambda_6} - \frac{2}{\lambda_4\lambda_6} - \frac{\lambda_3}{\lambda_3} - \frac{\lambda_3}{\lambda_3} - \frac{\lambda_3}{\lambda_3} \right) + p_1p_2p_3q_1\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_5 \right)$$

$$h = - \left(\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_5\lambda_6 \times \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_2} + \frac{\lambda_3}{\lambda_4\lambda_5} - \frac{1}{\lambda_3} - \frac{2}{\lambda_2} - \frac{2}{\lambda_1} - \frac{2}{\lambda_5} + \frac{\lambda_3}{\lambda_2\lambda_5} - \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_5} - \frac{2}{\lambda_4} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2\lambda_4} - \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_4} - \frac{2}{\lambda_6} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2\lambda_6} - \frac{\lambda_3}{\lambda_1\lambda_6} - \frac{\lambda_5\lambda_6}{\lambda_3} - \frac{\lambda_3}{\lambda_4\lambda_6} \right) + \left(\frac{p_1p_2p_3q_1\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_5\lambda_6 \times}{\lambda_5\lambda_6} + \frac{\lambda_3}{\lambda_4\lambda_5\lambda_6} - \frac{1}{\lambda_4\lambda_5} \right) \right)$$

$$w = \left(\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_5\lambda_6 \times \left(\frac{2 + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1}}{\lambda_5} + \frac{\lambda_3}{\lambda_4} + \frac{\lambda_3}{\lambda_6} \right) - \left(\frac{p_1p_2p_3q_1\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_5 \times}{\lambda_6} \cdot \left(-1 - \frac{\lambda_3}{\lambda_4} - \frac{\lambda_3}{\lambda_6} \right) \right) + p_4p_5p_6\lambda_3\lambda_4\lambda_6 \right)$$

$$m = -\lambda_1\lambda_2\lambda_3^2\lambda_5\lambda_6 \left(\lambda_4 + p_1p_2p_3q_1 - \frac{p_4p_5p_6}{\lambda_1\lambda_2} \right)$$

Аналогічно алгоритму аналізу DOM XSS вразливості [2, 5] щільність розподілення ймовірностей часу виконання технології тестування вразливості до SQL ін'єкцій дорівнює:

$$\phi(x) = 1/(2\pi i) \times \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zx} \frac{vz^2 + bz + k}{(z^7 + rz^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m)} dz, \quad (3)$$

де операція інтегрування виконується за допомогою інтегралу Бромвича-Вагнера [7]. Тоді

$$e^{zx}\Phi(z) = \frac{e^{zx}(vz^2 + bz + k)}{z^7 + rz^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m} = \frac{\mu(z)}{\psi(z)} \quad (4)$$

Тоді щільність розподілення часу виконання алгоритму тестування вразливості до SQL ін'єкцій

$$\phi(x) = \sum_{k=1}^7 \text{Res} [e^{zx}\Phi(z)] = \sum_{k=1}^7 \frac{\mu(z_k)}{\psi'(z_k)} = \sum_{k=1}^7 \frac{e^{zx}(vz^2 + bz + k)}{7z_k^6 + 6rz_k^5 + 5cz_k^4 + 4dz_k^3 + 3gz_k^2 + 2hz_k + w} \quad (5)$$

Багаточлен породжує сім полюсів

$$rz^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m.$$

Рішення рівняння

$$rz^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m = 0. \quad (6)$$

Може бути знайдено будь-яким методом, наприклад, по формулам Вієта [7]. В результаті обчислюються особливі точки $z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7$.

Таким чином, на основі експоненційної GERT-мережі розроблено математичну модель технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій, яка відрізняється від відомих, вдосконаленим способом визначення відстані між результатами ін'єкції. Використання в запропонованому способі критерію Джаро-Вінклера, для порівняння результатів ін'єкції SQL коду і введення порогового значення дозволить підвищити точність результатів тестування уразливості до SQL ін'єкцій. Дослідження GERT-моделі технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій.

Розглянемо приклад атаки SQL ін'єкцій. Суть таких ін'єкцій – впровадження в дані (передані через GET, POST запити або значення Cookie) довільного SQL коду. Знайдемо щільності розподілення $\phi(x)$ ймовірностей часу виконання алгоритму при умові, що z обирається як корені рівняння

$$(z^7 + rz^6 + cz^5 + dz^4 + gz^3 + hz^2 + wz + m) = 0,$$

умовні ймовірності та інтенсивності у гілках GERT-мережах мають значення:

$$p_1=p_2=p_3=p_4=p_5=0,999999, \\ p_6=0,9, \lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=0,9999, \lambda_4=0,8, \lambda_5=0,1, \lambda_6=0,999999.$$

Враховуючи приведені ознаки GERT-мережі, у відповідності з (2), а також використовуючи спеціалізований математичний пакет Mathcad, отримаємо, що в знаменнику виразу (3) сформований поліном

$$x^7 - 0.1x^6 - 4.174x^5 + 2.471x^4 - 4.509x^3 + 4.128x^2 + 2.014x - 0.169 = 0. \quad (7)$$

Корені цього полінома (та відповідно функція $\Phi(z)$) дорівнюють:

- $x_1 \approx -2.11254039866286, (P(x_1) \approx 0; \text{iter} = 1);$
- $x_2 \approx -0.561885634027132, (P(x_2) \approx 0; \text{iter} = 4);$
- $x_3 \approx -0.208185977139001 - i \cdot 0.60944124336833, (P(x_3) \approx 0; \text{iter} = 5);$
- $x_4 \approx -0.208185883644938 + i \cdot 0.609441306673327, (P(x_4) \approx 0; \text{iter} = 4);$
- $x_5 \approx -0.103581224605665, (P(x_5) \approx 0; \text{iter} = 3);$
- $x_6 \approx 1.64718955898524 - i \cdot 0.775107663208, (P(x_6) \approx 0; \text{iter} = 1);$
- $x_7 \approx 1.64718955909435 + i \cdot 0.775107667929698, (P(x_7) \approx 0; \text{iter} = 4).$

Досліджуємо залежність функції $\Phi(z)$ від інтенсивності z . На рис. 2 представлена крива графіку

залежності функції $\Phi(z)$ від z у розглянутих вище умовах. Як видно з рисунку випадкова величина z розподілена у відповідності до показового закону. Аналогічно алгоритму розрахунку $\phi(x)$, використуваному в GERT-моделі технології тестування DOM XSS уразливості [3, 5] знайдемо цю функцію і дослідимо її з використанням математичного пакета Mathcad.

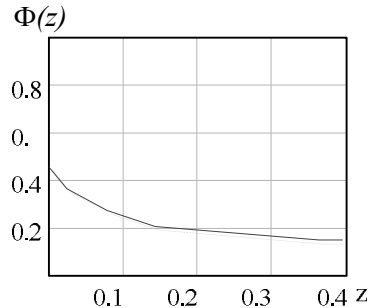


Рис. 2. Графік залежності функції $\Phi(z)$ від інтенсивності z

Відповідно до формули (5) $\phi(x)$ дорівнює:

$$\phi(x) = \sum_{k=1}^6 \operatorname{Re}_s \left[e^{zx} \Phi(z) \right] = \frac{e^{(a+\delta i)x} \left(v(a+\delta i)^2 + b(a+\delta i) + k \right)}{\left(7u(a+\delta i)^6 + 6r(a+\delta i)^5 + 5c(a+\delta i)^4 + 4d(a+\delta i)^3 + 3g(a+\delta i)^2 + 2h(a+\delta i) + w \right)} - \frac{e^{(a-\delta i)x} \left(v(a-\delta i)^2 + b(a-\delta i) + k \right)}{\left(7u(a-\delta i)^6 + 6r(a-\delta i)^5 + 5c(a-\delta i)^4 + 4d(a-\delta i)^3 + 3g(a-\delta i)^2 + 2h(a-\delta i) + w \right)}. \quad (8)$$

Аналогічно підходу, використуваному для GERT-моделі технології тестування DOM XSS уразливості використуваючи вирази Ейлера [2], отримаємо:

$$\phi(x) = \sum_{k=1}^6 \operatorname{Re}_s \left(e^{zx} \Phi(z) \right) = e^{(a+\delta i)x} \frac{\tau + i\beta}{\gamma + i\theta} + e^{(a-\delta i)x} \frac{\tau - i\beta}{\gamma - i\theta} = \frac{2e^{ax}}{\gamma^2 + \theta^2} \left((\tau\gamma + \beta\theta) \cos(\delta x) + (\tau\gamma - \beta\theta) \sin(\delta x) \right), \quad (9)$$

де $\tau = a^2v - \delta^2v + ab + k$, $\beta = 2a\delta v - \delta b$,

$$\gamma = 7ua^6 - 10ua^4\delta^2 + 105ua^2\delta^4 - 7u\delta^6 + 6ra^5 - 60ra^3\delta^2 + 30ra\delta^4 + 5ca^4 - 30ca^2\delta^2 + 5c\delta^4 + 4da^3 - 12da\delta^2 + 3ga^2 - 3g\delta^2 + 2ha + w,$$

$$\theta = 49ua^5\delta - 140ua^3\delta^3 + 49ua\delta^5 + 30ra^4\delta - 60ra^2\delta^3 + 6r\delta^5 + 20ca^3\delta - 20ca\delta^3 + 12da^3\delta - 4d\delta^3 + 6ga\delta + 2h\delta.$$

На рис. 3 представлені криві щільності розподілу ймовірностей часу виконання технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій для наведених вище умов (в якості вхідних даних використувалися корені полінома (7)).

При цьому рис. 3 а відповідає випадку коли в якості вхідних даних використувалося значення x_1 , б – x_2 , в – x_3 , г – x_4 , д – x_5 , е – x_6 , ж – x_7 . Як і у розглянутому вище прикладі, зовнішній вигляд кривих графіків рис. 3 дає підстави припустити, що не всі знайдені вище рішення (коріння полінома (7)) застосовні при математичному та імітаційному моделюванні в якості вхідних даних.

Так значення x_3 , x_4 , x_6 і x_7 неможливо надалі використувати при аналізі і моделюванні. У той же час зовнішній вигляд графіків, отриманих для значень x_1 , x_2 і x_5 дає підстави припустити, що випадкова величина часу виконання технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій відповідає гамма-розподілу (близьке до експоненціального).

Результати перевірки цієї гіпотези за критерієм χ^2 Пірсона [8] підтвердили її правдоподібність. Так при досить великому значенні довірчої ймовірності $Q=0,95$ для всіх розглянутих x_1 , x_2 і x_5 відповідні значення χ^2 :

$$\chi_1^2 = 19,3, \chi_2^2 = 15,1, \chi_5^2 = 25,6 \ll \overline{\chi^2} = 101,9.$$

Висновки

У роботі розроблена математична модель технології тестування Web-застосунків. В основу математичного моделювання покладено підхід GERT-мережевого синтезу. В результаті розроблено математичну модель технології тестування уразливості до SQL ін'єкцій, яка відрізняється від відомих, вдосконаленим способом визначення відстані між результатами ін'єкції.

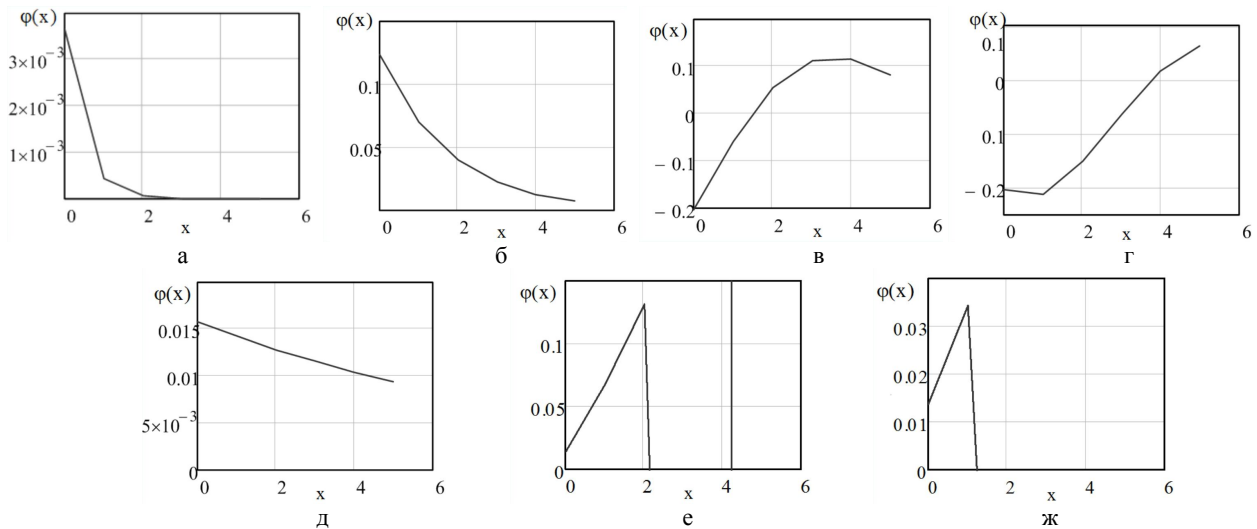


Рис. 3. Графіки щільності розподілу $\phi(x)$ ймовірності часу виконання технології тестування вразливості до SQL ін'єкцій

Використання в запропонованій математичній моделі критерію Джаро-Вінклера, для порівняння результатів ін'єкції SQL коду і введення порогового значення дозволило підвищити точність результатів тестування безпеки програмного забезпечення.

В ході дослідження представленої математичної моделі було визначено, що випадкова величина часу виконання даного процесу тестування в цілому відповідає гамма-розподілу. Перевірка цієї гіпотези була проведена за критерієм χ^2 Пірсона.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. OWASP Top 10 – 2017 RC1: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://github.com/OWASP>.
2. Kovalenko O., Smirnov O., Kovalenko A., Smirnov S., Vialkova, V. The mathematical model of the testing technology for DOM XSS vulnerabilities. Scientific & practical cyber security journal (SPCSJ). Tbilisi: SCSA, 2018Vol. 2, Is. 1, pp. 22-28.
3. Коваленко А.В. Методы качественного анализа и количественной оценки рисков разработки программного обеспечения / А.А. Смирнов, А.В. Коваленко // Системы обработки информации. – Вып. 5(142). – X.: ХУПС, 2016. – С. 153-157.
4. Технология тестирования DOM XSS уязвимости / А.В. Коваленко, А.С. Коваленко, А.А. Смирнов, С.А. SPCSJ. № 1. [Электронный Журнал]. Грузия. Тбилиси: SCSA – 2017. URL: <http://journal.scsa.ge/ru/issues/2017/09/484>
5. Коваленко А.В. Проблемы анализа и оценки рисков информационной деятельности / А.А. Смирнов, А.В. Коваленко, Н.Н. Якименко, А.П. Доренский // Системы обработки информации. – Выпуск 3(140). – X.: ХУПС – 2016. – С. 40-42.
6. About The Open Web Application Security Project – OWASP: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.owasp.org/index.php/About_The_Open_Web_Application_Security_Project.
7. Testing for SQL Injection (OTG-INPVAL-005) – OWASP: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.owasp.org/index.php/103_Testing_for_SQL_Injection_\(OTG-INPVAL-005\)](https://www.owasp.org/index.php/103_Testing_for_SQL_Injection_(OTG-INPVAL-005)).

Received (Надійшла) 30.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.11.2019

Mathematical model for testing sql injection vulnerability technology

O. Kovalenko

Abstract. The paper presents the results of the study and testing algorithms for vulnerability to SQL injection, one of the most common types of attacks against Web-based applications. Based on the analysis of the methodology for testing the vulnerability of Web applications to the DOM XSS and the materials of the Open Web Application Security Project, an algorithm of analysis of the vulnerability of Web applications to SQL injections has been developed. A distinctive feature of this algorithm is consideration of only the vulnerability that is present in the GET URL parameters and uses only the blind SQL injection of code that uses the feature of using Boolean operators in SQL queries (Boolean blind SQL injection). Based on the presented algorithm, a GERT-model of a technology for testing vulnerabilities to SQL injections was developed, in which the nodes of the graph are interpreted by the states of the computer system in the process of testing the vulnerability to SQL injections, and the branches of the graph are interpreted as probabilistic-temporal characteristics of transitions between states. Thus, on the basis of the exponential GERT network, a mathematical model was developed for testing SQL injection vulnerability technology, which differs from the known technologies by improved method for determining the distance between injection results. The use of the Jaro–Winkler criterion in the proposed method for comparing the results of an injection of SQL code and introducing a threshold value will improve the accuracy of the results of software security testing. An example of an SQL injection attack, the essence of which is the introduction of arbitrary SQL code into data (transmitted via GET, POST or Cookie values), is considered. Graphs were constructed, the curves of which suggest that not all of the found solutions are applicable in mathematical and simulation modeling as input data. At the same time, the appearance of the graphs obtained for other values suggests that the random value of the execution time of the technology for testing the vulnerability to SQL injection corresponds to the gamma distribution (close to exponential). Testing of this hypothesis is made by the χ^2 Pearson criterion.

Keywords: SQL Injection Vulnerability, GERT-networks, security vulnerabilities, testing algorithms, mathematical testing model.

Н. Г. Кучук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

СИНХРОНІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ НА ГІПЕРКОНВЕРГЕНТНІЙ ПЛАТФОРМІ З ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ ЇЇ ВУЗЛІВ

Актуальність дослідження. В процесі функціонування комп'ютерної мережі гіперконвергентної архітектури за рахунок централізованого управління збільшується час обробки системних транзакцій. Але для деяких підсистем, особливо для тих, що повинні функціонувати у режимі, наближеному до режиму реального часу, дані показники є дуже суттєвими. **Метою статті** є формування такого розподілу завдань по вузлах мережі, для якого середня затримка пакету прийматиме мінімальне значення. Це забезпечить максимальну синхронізацію між інформаційною структурою мережі та обчислювальними ресурсами її вузлів. **Результати дослідження.** Розроблена математична модель розподілу завдань між вузлами комп'ютерної мережі на гіперконвергентній платформі. У моделі мінімізована інтенсивність обміну між вузлами мережі. Для цього вводиться поняття штрафу при розподілі завдань на вузли мережі. Розроблений метод розподілу завдань між вузлами мережі на гіперконвергентній платформі. Рішення задачі пошуку раціонального розподілу завдань множини по вузлах множини має ітераційний характер. Даний метод розвинений за рахунок мінімізації середньої затримки пакету даних в мережі при розподіленій обробці завдань. Запропонована математична модель управління розподіленою обробкою завдань в мережі на гіперконвергентній платформі дозволяє описати завдання пошуку раціонального розбиття множини завдань, що обробляються в мережі, на підмножини і їх розподілення по вузлах мережі, що мінімізує середню затримку пакету даних. при розробці моделі прийнято, що загальний сумарний доступний обчислювальний ресурс вузлів мережі є рівним загальному сумарному необхідному обчислювальному ресурсу транзакцій системи. з цією метою вводиться фіктивний вузол з доступним обчислювальним ресурсом та фіктивне завдання з відповідним штрафом. **Висновок.** Сформований розподіл завдань по вузлах мережі, для якого середня затримка пакету прийматиме мінімальне значення, що забезпечить максимальну синхронізацію між інформаційною структурою мережі та її обчислювальними ресурсами.

Ключові слова: гіперконвергентна архітектура; синхронізація, час виконання запиту, штраф.

Вступ

Актуальність завдання. Конвергентні та гіперконвергентні рішення для базових комп'ютерних мереж за рахунок централізації управління суттєво зменшують витрати на обслуговування [1]. При такому технологічному рішенні передбачається об'єднання пам'яті, обчислювальних, програмних і мережевих ресурсів в пул, заздалегідь об'єднаних для роботи в дата-центрі [2]. Управління відбувається через загальну консоль адміністрування [3]. Перевагами гіперконвергентної інфраструктури є такі [4]:

1) спрощення інфраструктури управління – централізація управління сервером, мережевих ресурсів і сховищами даних, що дозволяє оптимізувати повсякденне обслуговування;

2) масштабна ємність сховищ даних – усі поширені комутаційні мережі і протоколи вбудовані в гіперконвергентну інфраструктуру, що дозволяє додати в неї додаткові гігабайти простіше і швидше;

3) швидка підготовка і виділення ресурсів – скорочення часу підготовки і виділення ресурсів;

4) більш швидке реагування інформаційної технології забезпечує гнучкість для реагування на зміни на ринку і зміни пріоритетів у бізнесі;

5) спрощений перехід в хмару спрощує впровадження приватних або гібридних хмар;

6) підвищений контроль забезпечує одночасне керування кількома функціями і пристроями.

Постановка завдання. Звісно, крім вищеперахованих переваг технологія, що розглядається, має і ряд недоліків. Найбільш суттєвим з них є послаблення характеристик деяких параметрів QoS,

зокрема, часових характеристик. Таким чином, завдання забезпечення необхідних часових характеристик може бути сформульованим таким чином: необхідно запропонувати метод розподілу завдань між вузлами комп'ютерної мережі на гіперконвергентній платформі, котрий мінімізує час виконання транзакцій та враховує її особливості.

Аналіз літератури. Для вирішення поставленого завдання пропонується багато різних методів [5–22]. Однак, всі перераховані методи не в повній мірі враховують особливості гіперконвергентної платформи та мають порівняно невисоку обчислювальну ефективність, що обмежує рішення поставленого завдання у гіперконвергентному середовищі. У зв'язку з цим, виникає необхідність в розробці відповідного методу.

Мета статті. Зауважимо, що максимально можлива синхронізація інформаційної структури мережі на гіперконвергентній платформі з обчислювальними ресурсами її вузлів забезпечить мінімізацію часу виконання системних транзакцій. Тому метою статті є формування такого розподілу γ завдань по вузлах мережі, для якого середня затримка пакету прийматиме мінімальне значення, що забезпечить максимальну синхронізацію між інформаційною структурою мережі та обчислювальними ресурсами її вузлів.

1. Математична модель розподілу завдань між вузлами комп'ютерної мережі на гіперконвергентній платформі

Розглянемо мережу, що складається з множини вузлів Y , в якій необхідно здійснити обробку із

множини Z завдань. Для кожного вузла мережі $y_i \in Y$, $1 \leq i \leq h_y$, де h_y – кількість вузлів мережі, що приймають участь у обробці інформаційних потоків, задамо продуктивність вузлів ϕ_{y_i} . Відповідно до множини вузлів Y маємо вектор доступних обчислювальних ресурсів мережі $\phi_y = (\phi_{y_1}, \dots, \phi_{y_{h_y}})$. Для

спрощення будемо вважати, що вартість одиниці обчислювального ресурсу однакова по всіх вузлах множини Y і що кожна пара вузлів y_a і y_i може обмінюватися даними між собою найкоротшим маршрутом завдовжки $h_{w_{a,i}}$, при цьому довжина маршруту визначається кількістю каналів передачі даних, що входять в маршрут між вузлами y_a і y_i . Відповідно до множини Y маємо квадратну матрицю довжин найкоротших маршрутів $H_w = \left\| h_{w_{a,i}} \right\|$ між кожною парою вузлів мережі y_a та y_i , де $1 \leq a \leq h_y$, $1 \leq i \leq h_y$.

Кожне завдання $z_b \in Z$, $1 \leq b \leq h_z$, де h_z – кількість незалежних завдань, що обробляються в мережі, характеризується необхідним обчислювальним ресурсом ϕ_{z_b} для його обробки. Таким чином, маємо вектор $\phi_z = (\phi_{z_1}, \dots, \phi_{z_{h_z}})$ необхідних обчислювальних ресурсів мережі по всіх завданнях множини Z . Для кожного завдання $z_b \in Z$ заданий вектор

$u_{z_b} = (u_{z_{b1}}, \dots, u_{z_{bh_y}})$, що визначає інтенсивність обміну завдання z_b з кожним з вузлів множини Y . Для всієї сукупності завдань, що обробляються в мережі, маємо прямокутну матрицю U_z розміром $h_z \times h_y$, складену з векторів u_{z_b} . При цьому кожне завдання множини Z може оброблятися будь-яким одним вузлом множини Y .

З урахуванням викладених допущень завдання розподілу завдань між вузлами комп'ютерної мережі на гіперконвергентній платформі з метою мінімізації інтенсивності обміну між вузлами формулюється таким чином.

Є множини Y і Z , представлені відповідно кортежами $\langle Y, \phi_y, H_w \rangle$ і $\langle Z, \phi_z, U_z \rangle$. Потрібно знайти такий розподіл $\gamma: Z \rightarrow Y$, при якому цільова функція $F(\gamma)$, що задає середню інтенсивність обміну між вузлами приймає мінімальне значення:

$$F(\gamma) = \frac{\sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} u_{ra,i} \cdot h_{wa,i}}{\sum_{b=1}^{h_z} \sum_{i=1}^{h_y} u_{zb,i}} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{при } \forall z_b \in Z \quad \sum_{a=1}^{h_y} k_{b,a} = 1; \quad (2)$$

$$\forall y_a \in Y \quad \sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot \phi_{z_b} \leq \phi_{y_a}, \quad (3)$$

$$\text{де } u_{ra,i} = \begin{cases} \sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot u_{zb,i}, & \text{якщо } a \neq i; \\ 0, & \text{якщо } a = i; \end{cases} \quad (4)$$

$$k_{b,a} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } z_b^{(\gamma)} \rightarrow y_a; \\ 0, & \text{у іншому випадку.} \end{cases} \quad (5)$$

Сумарна інтенсивність обміну завдань, розподілених по вузлах мережі з їх абонентами, визначається виразом

$$u_z^{(\gamma)} = \sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} u_{ra,i} = \sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} \sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot u_{zb,i}. \quad (6)$$

Максимальна сумарна інтенсивність обміну завдань, що обробляються в мережі, можна представити таким чином:

$$u_{z_{\max}} = \sum_{b=1}^{h_z} \sum_{i=1}^{h_y} u_{zb,i}, \quad (7)$$

при цьому $u_z^{(\gamma)} \leq u_{z_{\max}}$.

Тоді цільова функція мінімізації інтенсивності обміну між вузлами має такий вигляд:

$$F(\gamma) = \frac{1}{u_{z_{\max}}} \cdot \sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} h_{wa,i} \cdot \sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot u_{zb,i} = \frac{1}{u_{z_{\max}}} \cdot \sum_{a=1}^{h_y} \sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot \sum_{i=1}^{h_y} u_{zb,i} \cdot h_{wa,i}. \quad (8)$$

Введемо поняття штрафу при розподілі завдання $z_b \in Z$ на вузол мережі $y_a \in Y$:

$$s_{z_b,a} = \sum_{i=1}^{h_y} u_{zb,i} \cdot h_{wa,i}. \quad (9)$$

$$\text{Тоді } F(\gamma) = \frac{1}{u_{z_{\max}}} \cdot \sum_{a=1}^{h_y} \sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot s_{z_b,a}. \quad (10)$$

Таким чином, завдання мінімізації інтенсивності обміну між вузлами мережі зведене до мінімізації лінійної функції, визначуваної виразом (10), при виконанні умови

$$\sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot \phi_{z_b} \leq \phi_{y_a}, \quad \forall 1 \leq a \leq h_y. \quad (11)$$

2. Метод розподілу завдань між вузлами мережі на гіперконвергентній платформі

На основі сукупностей значень $s_{z_b,a}$ складається матриця штрафів розподілу γ множини завдань Z по вузлах множини Y $S_z = \left\| s_{z_b,a} \right\|$. При цьому, у разі неприпустимості розподілу завдання z_b на вузол y_a , наприклад, якщо $\phi_{z_b} > \phi_{y_a}$, значення $s_{z_b,a}$ приймається рівним нескінченності.

Для множини завдань Z формується вектор мінімальних штрафів

$$s_{z_{\min}} = (s_{z_{\min_1}}, \dots, s_{z_{\min_{h_z}}}),$$

де компонент $s_{z_{\min_b}} = \min s_{z_{b,a}}$ визначає мінімальний штраф при розподілі завдання z_b на вузол множини Y .

На базі матриці S_z формується матриця $S'_z = \| \|s'_{z_{b,a}}\| \|$, у якій $s'_{z_{b,a}} = s_{z_{b,a}} - s_{z_{\min_b}} + 1$. Як базові елементи визначаються всі елементи матриці S'_z , окрім тих, значення яких рівні $s'_{z_{b,a}} = \infty - s_{z_{\min_b}} + 1$.

Нехай максимальне значення базового елемента матриці S'_z є $s'_{z_{\max}}$.

На основі матриці S'_z формується матриця $N_z = \| \|n_{z_{a,j}}\| \|$, де $1 \leq j \leq s'_{z_{\max}}$, при цьому величина $s'_{z_{\max}}$ округляється до найближчого цілого значення. Кожен вектор-рядок

$$n_{z_a} = \left(n_{z_{a1}}, \dots, n_{z_{a s'_{z_{\max}}}} \right)$$

матриці N_z відповідає вузлу $y_a \in Y$, а її компоненти $n_{z_{a,j}}$ містять номери завдань $z_b \in Z$, розподілених на вузол y_a , для яких значення штрафу при розподілі на вузол y_a більше відповідних ним значень мінімальних штрафів, визначуваних вектором $s_{z_{\min}}$ на величину $s'_{z_{b,a}} - 1$, $(s_{z_{b,a}} - s_{z_{\min_b}} = s'_{z_{b,a}} - 1)$, при цьому індекс j компоненту $s_{z_{a,j}}$ визначається як $j = s'_{z_{b,a}}$.

Рішення задачі пошуку раціонального розподілу завдань множини Z по вузлах множини Y має ітераційний характер. На кожній k -й ітерації, де $k \leq s'_{z_{\max}}$ розглядається матриця N_z^k , складена з k першочергових стовпців матриці N_z . Відповідно до отриманої матриці N_z^k проводиться спроба сформулювати допустимий розподіл завдань множини Z по вузлах мережі. Якщо такий розподіл буде отриманий для матриці N_z^k при $k=1$, то очевидно, що воно є оптимальним. В цьому випадку кожне завдання $z_b \in Z$ розподіляється на той вузол множини Y , для якого величина штрафу $s_{z_{b,a}}$ приймає мінімальне значення.

Далі розглянемо завдання пошуку раціонального розбиття множини завдань, що обробляються в мережі, на підмножини і їх розподіли по вузлах мережі, з метою мінімізації середньої затримки пакету даних в мережі.

3. Мінімізація середньої затримки пакету даних в мережі при розподіленій обробці завдань

Кожен вузол $y_i \in Y$ характеризується доступним обчислювальним ресурсом ϕ_{y_i} . Відповідно до

множини Y маємо вектор $\phi_y = (\phi_{y_1}, \dots, \phi_{y_{h_y}})$ доступних обчислювальних ресурсів вузлів мережі.

Кожне завдання $z_b \in Z$, $1 \leq b \leq h_z$, характеризується необхідним обчислювальним ресурсом ϕ_{z_b} для її виконання. По всіх завданнях множини Z маємо вектор $\phi_z = (\phi_{z_1}, \dots, \phi_{z_{h_z}})$ необхідних обчислювальних ресурсів.

По кожному завданню z_b дано два вектори u_{z_b} і u'_{z_b} , де вектор $u_{z_b} = (u_{z_{b1}}, \dots, u_{z_{bh_y}})$ визначає інтенсивність обміну завдання z_b з кожним вузлом множини Y , вектор $u'_{z_b} = (u'_{z_{b1}}, \dots, u'_{z_{bh_y}})$ визначає інтенсивність обміну завдання z_b з іншими завданнями множини Z . Тут $u'_{z_{bb}} = 0$. По всій сукупності завдань, що обробляються в мережі, маємо прямокутну матрицю U_z розміру $h_z \times h_y$ і квадратну матрицю U_z розміру, складені з векторів u_{z_b} і u'_{z_b} відповідно. Множини Y і Z представимо відповідно кортежами

$$\langle Y, \phi_y, H_w \rangle \text{ і } \langle Z, \phi_z, U_z, U'_z \rangle,$$

де $H_w = \| \|h_{w_{a,i}}\| \|$ – матриця довжин найкоротших маршрутів між кожною парою вузлів мережі y_a і y_i , $1 \leq a \leq h_y$, $1 \leq i \leq h_y$

Розглянемо цільову функцію, яка визначається виразом

$$F(\gamma) = \frac{\sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} u_{r_{a,i}} \cdot h_{w_{a,i}}}{\sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} u_{r_{a,i}}}, \quad (12)$$

$$u_{r_{a,i}} = \begin{cases} \sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot u_{z_{b,i}} + \sum_{b=1}^{h_z} \sum_{j=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot k_{j,i} \cdot u'_{z_{b,j}}, & \text{якщо } a \neq i; \\ 0, & \text{якщо } a = i; \end{cases}$$

$$k_{b,a} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } z_b^{(\gamma)} \rightarrow y_a; \\ 0, & \text{у іншому випадку.} \end{cases}$$

Тоді необхідно знайти такий розподіл $\gamma : Z \rightarrow Y$, щоб вираз (12) приймав мінімальне значення при виконанні умови

$$\forall y_a \in Y \left| \sum_{b=1}^{h_z} k_{b,a} \cdot \phi_{z_b} \leq \phi_{y_a} \right. \quad (13)$$

Розподіл γ завдань $z_b \in Z$ по вузлах $y_a \in Y$ можна представити характеристичною матрицею $K^{(\gamma)} = \| \|k_{b,a}\| \|$, $1 \leq b \leq h_z$.

Добуток вектор-стовпця k_a і матриці U'_z є вектором-стовпцем

$$u'_{r_a} = \begin{pmatrix} u'_{r_{a1}} \\ \vdots \\ u'_{r_{ah_z}} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

j -й компонент якого рівний сумарній інтенсивності обміну завдання z_j , $1 \leq j \leq h_z$, із завданнями, розподіленими на вузол y_a . Значення загальних сумарних інтенсивностей обміну завдань множини Z з вузлом $y_a \in Y$ з урахуванням значень сумарних інтенсивностей обміну цих завдань із завданнями, розподіленими на вузол y_a , визначаються як

$$u''_{r_a} = u'_{r_a} + u_{z_a}, \quad (15)$$

де u_{z_a} – вектор-стовпець матриці U_z .

Скалярний добуток векторів u''_{r_a} і k_i :

$$u''_{r_a} \cdot k_i = \sum_{b=1}^{h_z} u''_{r_{ab}} \cdot k_{ib} = u_{r_{a,i}}, \quad (16)$$

де $a \neq i$, дорівнює сумарній інтенсивності обміну вузлів y_a і y_i . Сукупність значень $u_{r_{a,i}}$ є квадратною матрицею $U_r (h_y \times h_y)$, у якій $u_{r_{a,i}} = 0$ при $a = i$.

Сумарна інтенсивність обміну між вузлами мережі при розподілі γ завдань $z_b \in Z$ по вузлах $y_a \in Y$ визначається виразом

$$c_u^{(\gamma)} = \sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} u_{r_{a,i}} = \sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} u''_{r_a} \cdot k_i. \quad (17)$$

Тоді
$$F^{(\gamma)} = \frac{\sum_{a=1}^{h_y} u_{r_a} \cdot h_{w_a}}{\sum_{a=1}^{h_y} \sum_{i=1}^{h_y} u''_{r_a} \cdot k_i} = \frac{\sum_{a=1}^{h_y} u_{r_a} \cdot h_{w_a}}{c_u^{(\gamma)}}, \quad (18)$$

де $u_{r_a} \cdot h_{w_a}$ – скалярний добуток вектор-рядка матриці U_r і вектор-рядка матриці H_w .

Таким чином, завдання пошуку раціонального розбиття множини завдань Z , що обробляються в мережі передачі даних, на підмножини і їх розподіли по вузлах $y_a \in Y$ зведена до мінімізації білінійної цільової функції $F^{(\gamma)}$, що визначається виразом (4.31) на цілочисельних векторах при лінійних обмеженнях $\phi_z \cdot k_a \leq \phi_{y_a}$ для $1 \leq a \leq h_y$.

На практиці часто мають місце ситуації, коли кожне завдання $z_b \in Z$ представлено набором підзадач, які можуть виконуватися на різних вузлах множини Y , і підзадачі завдання z_b не обмінюються інформацією ні між собою, ні з підзадачами інших завдань множини Z . В цьому випадку приведені завдання декілька спрощується і може бути зведено до такого вигляду.

Хай задані множини Y і Z , що мають раніше вказаний сенс та представляються кортежами

$\langle Y, \phi_y, H_w \rangle$ та $\langle Z, \phi_z, U_z \rangle$. Передбачається, що всі підзадачі завдання $z_b \in Z$ мають однакові інтенсивності $u''_{z_{b,i}}$ обміну з вузлом $y_i \in Y$, тобто

$$\forall z_b \in Z, y_i \in Y \left| u''_{z_{b,i}} = u_{z_{b,i}} / u_{z_b}. \quad (19)$$

Потрібно знайти раціональний розподіл підзадач завдань множини Z по вузлах множини Y . В результаті розподілу підзадач завдань множини Z формується матриця M_z , в якій кожному завданню $z_b \in Z$ повинен бути зіставлений вектор-рядок

$$m_{z_b} = \left(m_{z_{b1}}, \dots, m_{z_{bh_y}} \right),$$

що є розподілом підзадач завдання z_b по вузлах множини Y , тобто компонент $m_{z_{b,i}}$ вектора m_{z_b} є необхідним обчислювальним ресурсом вузла y_i , необхідний для виконання підзадачі завдання z_b . Якість розподілу γ підзадач завдань $z_b \in Z$ по вузлах $y_i \in Y$ оцінюватимемо значенням цільової функції $F^{(\gamma)}$. Основою визначення $F^{(\gamma)}$ служить штраф для підзадачі завдання $z_b \in Z$, розподіленого на вузол $y_a \in Y$.

Якщо підзадача завдання $z_b \in Z$ розподілена на вузол $y_a \in Y$, то їй відповідає штраф

$$s_{z_{b,a}} = \sum_{i=1}^{h_y} u''_{z_{b,i}} \cdot h_{w_{a,i}} = \sum_{i=1}^{h_y} \left(u_{z_{b,i}} \cdot h_{w_{a,i}} / \phi_{z_b} \right).$$

Таким чином, для кожного завдання $z_b \in Z$ маємо вектор $s_{z_b} = \left(s_{z_{b1}}, \dots, s_{z_{bh_y}} \right)$ компонент $s_{z_{b,a}}$

якого визначає штраф при розподілі на вузол $y_a \in Y$ підзадачі завдання z_b . Цільова функція, що характеризує отриманий розподіл γ завдань $z_b \in Z$ по вузлах $y_a \in Y$, має вигляд

$$F^{(\gamma)} = \frac{1}{u_{z_{\max}}} \cdot \sum_{b=1}^{h_z} \sum_{a=1}^{h_y} m_{z_{b,a}} \cdot s_{z_{b,a}}, \quad (20)$$

де $u_{z_{\max}}$ – незалежна від розподілу γ величина, що визначає максимальну сумарну інтенсивність обміну завдань з вузлами мережі відповідно до виразу

$$u_{z_{\max}} = \sum_{b=1}^{h_z} \sum_{i=1}^{h_y} u_{z_{b,i}} \quad (21)$$

при
$$\forall y_a \in Y \left| \sum_{b=1}^{h_z} m_{z_{b,a}} \leq \phi_{y_a}; \quad (22)$$

$$\forall z_b \in Z \left| \sum_{a=1}^{h_y} m_{z_{b,a}} \leq \phi_{z_b}; \quad (23)$$

$$\sum_{a=1}^{h_y} \phi_{y_a} \geq \sum_{b=1}^{h_z} \phi_{z_b}; \quad (24)$$

$$s_{z_{b,a}} \geq 0, m_{z_{b,a}} \geq 0; 1 \leq a \leq h_y; 1 \leq b \leq h_z \quad (25)$$

Отже, завдання є таким. Хай задана множина завдань Z і вузлів мережі Y , визначувані кортежами $\langle Z, \phi_z, U_z \rangle$ і $\langle Y, \phi_y, H_y \rangle$. Потрібно знайти такий розподіл γ що задовольняє умовам 22 – 25, щоб вираз (21) приймав мінімальне значення.

При побудові алгоритму рішення сформульованої задачі приймаємо, що загальний сумарний доступний обчислювальний ресурс вузлів множини Y рівний загальному сумарному необхідному обчислювальному ресурсу завдань множини Z , тобто

$$\sum_{a=1}^{h_y} \phi_{y_a} = \sum_{b=1}^{h_z} \phi_{z_b}.$$

З цією метою необхідно ввести фіктивний (h_{y+1}) -й вузол з доступним обчислювальним ресурсом $\phi_{y_{h_{y+1}}}$ та фіктивне (h_z+1) -ше завдання з необхідним обчислювальним ресурсом $\phi_{z_{h_z+1}}$, при яких

$$\sum_{a=1}^{h_{y+1}} \phi_{y_a} = \sum_{b=1}^{h_z+1} \phi_{z_b},$$

та прийняти штраф:

$$s_{z_{h_z+1}, a} = 0, \quad 1 \leq a \leq h_{y+1},$$

$$s_{z_b, h_{y+1}} = \max_{1 \leq b \leq h_z, 1 \leq a \leq h_y} s_{z_b, a}, \quad 1 \leq b \leq h_z + 1.$$

Звідси модель (20) – (25) набере такого вигляду:

$$F(\gamma) = \frac{1}{u_{z_{\max}}} \cdot \sum_{b=1}^{h_z+1} \sum_{a=1}^{h_{y+1}} m_{z_b, a} \cdot s_{z_b, a} \rightarrow \min, \quad (26)$$

при
$$\sum_{b=1}^{h_z+1} m_{z_b, a} = \phi_{y_a}, \quad 1 \leq a \leq h_{y+1};$$

$$\sum_{a=1}^{h_{y+1}} m_{z_b, a} = \phi_{z_b}, \quad 1 \leq b \leq h_z + 1; \quad \sum_{a=1}^{h_{y+1}} \phi_{y_a} = \sum_{b=1}^{h_z+1} \phi_{z_b};$$

$$s_{z_b, a} \geq 0, m_{z_b, a} \geq 0 \text{ для } 1 \leq a \leq h_y, 1 \leq b \leq h_z;$$

$$s_{z_{h_z+1}, a} = 0 \text{ для } 1 \leq a \leq h_{y+1};$$

$$s_{z_b, h_{y+1}} = \max_{1 \leq b \leq h_z, 1 \leq a \leq h_y} s_{z_b, a} \text{ для } 1 \leq b \leq h_z + 1.$$

Запропонована математична модель управління розподіленою обробкою завдань в мережі на гіперконвергентній платформі дозволяє описати завдання пошуку раціонального розбиття множини завдань,

що обробляються в мережі, на підмножини і їх розподілення по вузлах мережі, що мінімізує середню затримку пакету даних.

Висновки

Таким чином, розроблена математична модель розподілу завдань між вузлами комп'ютерної мережі на гіперконвергентній платформі. У моделі мінімізована інтенсивність обміну між вузлами мережі. Для цього вводиться поняття штрафу при розподілі завдань на вузли мережі. Розроблений метод розподілу завдань між вузлами мережі на гіперконвергентній платформі. Рішення задачі пошуку раціонального розподілу завдань множини по вузлах множини має ітераційний характер. Запропонована математична модель управління розподіленою обробкою завдань в мережі на гіперконвергентній платформі дозволяє описати завдання пошуку раціонального розбиття множини завдань, що обробляються в мережі, на підмножини і їх розподілення по вузлах мережі, що мінімізує середню затримку пакету даних. При розробці моделі прийнято, що загальний сумарний доступний обчислювальний ресурс вузлів мережі є рівним загальному сумарному необхідному обчислювальному ресурсу транзакцій системи. з цією метою вводиться фіктивний вузол з доступним обчислювальним ресурсом та фіктивне завдання з відповідним штрафом.

Отже, сформований розподіл завдань по вузлах мережі, для якого середня затримка пакету прийматиме мінімальне значення, що забезпечить максимальну синхронізацію між інформаційною структурою мережі та обчислювальними ресурсами її вузлів.

Напрямок подальших досліджень: розглянутий підхід представляє безперечний інтерес для подальшого вивчення, так як дозволяє істотно зменшити час передачі даних.

Вдячність

Цю роботу було частково профінансовано Європейським Союзом у контексті проекту «dComFra – Digital competence framework for Ukrainian teachers and other citizens» (Project Number: 598236-EPP-1-2018-1-LT-EPPKA2-SVNE-SP) за програмою ERASMUS+. Підтримка Європейською Комісією створення цієї роботи не означає повного схвалення її змісту, який віддзеркалює лише погляди авторів. Комісія не може нести відповідальності за будь-яке використання інформації, яку розміщено в цій роботі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- White Paper: Riverbed Hyper-converged Edge, available at: <https://www.riverbed.com/document-repository/white-paper--riverbed-hyper-converged-edge.html>.
- Черняк, Л. (2012), “Время конвергентных инфраструктур”, Открытые системы. СУБД, № 4, available at: <https://www.osp.ru/os/2012/04/13015754/>.
- Ганьжа, Д. (2016), “Гиперконвергенция: ИТ-инфраструктура на раз, два, три”, /Журнал сетевых решений., № 5, available at: www.osp.ru/lan/2016/05/13049349.
- Кучук Н. Г. Метод розгалуження запитів до сховищ даних систем, що мають гіперконвергентну інфраструктуру / Н. Г. Кучук, І. С. Зиков, В. І. Панченко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава : ПНТУ, 2019. – Вип. 5(57). – С. 51-54. – DOI: <https://doi.org/10.26906//SUNZ.2019.5.051>
- Кучук Г. А. Концептуальний підхід до синтезу структури інформаційно-телекомунікаційної мережі / Г. А. Кучук, І. В. Рубан, О. П. Давікоза // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2013. – Вип. 7 (114). – С. 106 – 112.

6. Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. – К.: Наук. думка, 1985. – 520 с.
7. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускну здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
8. Gelenbe E. Analysis and synthesis of computer systems (2nd Edition) / E. Gelenbe, G. Pujolle // *Advances in Computer Science and Engineering : Texts – Vol.4 – 2010.* – 309 p.
9. Whitt W. The Queuing Network Analyzes / W. Whitt // *Bell System Tech. I.* – 1983. – Vol. 62, № 9. – P. 2779 – 2815.
10. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
11. Кучук Г.А. Синтез стратифікованої інформаційної структури інтеграційної компоненти гетерогенної складової Єдиної АСУ Збройними Силами України / Г. А. Кучук, О. П. Давікоза // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2013. – № 3 (12). – С. 154-158.
12. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – К.: ЦНДІ НІУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
13. Saravana, Balaji B., Mohamed, Uvaze Ahamed, Eswaran C. and Kannan R., (2019), “Prediction-based Lossless Image Compression”, *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics* (Springer), Vol. 30, No 1, pp.1749 – 17961, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00665-5_161
14. Sivaram, M., Batri, K., Amin Salih, Mohammed and Porkodi V. (2019), “Exploiting the Local Optima in Genetic Algorithm using Tabu Search”, *Indian Journal of Science and Technology*, Volume 12, Issue 1, doi: <http://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i1/139577>
15. Ruban, I. Redistribution of base stations load in mobile communication networks / I. Ruban, H. Kuchuk, A. Kovalenko // *Innovative technologies and scientific solutions for industries.* – 2017. – No 1 (1) – P. 75-81.
16. Кучук Г. А. Метод параметричного управління передачею даних для модифікації транспортних протоколів беспроводных сетей / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // *Системи обробки інформації*. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
17. Кучук Г. А., Можаяев А. А. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. 2007. № 8 (27). С. 261-271.
18. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – К.: ЦНДІ НІУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
19. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. ЛуковаЧуйко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
20. Sivaram, M., Yuvaraj, D., Amin Salih, Mohammed, Porkodi, V. and Manikandan V. (2018), “The Real Problem Through a Selection Making an Algorithm that Minimizes the Computational Complexity”, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 8, iss. 2, 2018, pp. 95-100.
21. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study”, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
22. Kosenko V. Mathematical model of optimal distribution of applied problems of safety-critical systems over the nodes of the information and telecommunication network. *Сучасні інформаційні системи (Advanced Information Systems)*. 2017. Т. 1, № 2. С. 4-9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.01>

Received (Надійшла) 20.11.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.12.2019

Synchronization of information structure networks on the hyperconvergent platform with the computing resources of its nodes

N. Kuchuk

Abstract. The relevance of research. In the process of functioning of the computer network of the hyperconverged architecture due to the centralized management, system transaction processing time is increased. But for some subsystems, especially those that are supposed to function in real-time mode, these figures are very significant. **The purpose of the article** is to formulate the distribution of tasks among network nodes. For which the average packet delay takes a minimum value. This will ensure maximum synchronization between the information structure of the network and the computing resources of its nodes. **Research results.** A mathematical model for the distribution of tasks between nodes of a computer network on a hyperconverged platform is developed. The exchange rate between network nodes are minimizes in the model For this, the concept of a penalty is introduced when distributing tasks between network nodes. A method for distributing tasks between network nodes on a hyperconverged platform has been developed. The solution to the problem of finding a rational distribution of tasks is iterative. This method is developed by minimizing the average delay of a data packet in the network. This happens during distributed processing of tasks. A mathematical model for managing distributed processing of tasks on the network on a hyperconvergent platform is proposed. It allows you to describe the search for a rational breakdown of tasks that are processed on the network. Subdivision into subsets and their distribution over network nodes minimizes the average data packet delay. When developing a model, the following condition is defined. The summed available computing resource of the network nodes is equal to the total. It is necessary for the computing resource of the transaction system. To this end, a fictitious node with an available computing resource and a fictitious task with an appropriate penalty are introduced. **Conclusion.** Formed distribution of tasks on the network nodes. For which the average packet delay takes a minimum value. This ensures maximum synchronization between the information structure of the network and its computing resources.

Keywords: hyperconvergent architecture, synchronization, query time, fine.

О. М. Маковейчук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД ДЕКОДУВАННЯ МОЗАІЧНОГО СТОХАСТИЧНОГО МАРКЕРА ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Анотація. Предметом вивчення в статті є маркери доповненої реальності. Метою є розробка методу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. **Завдання:** аналіз основних операцій у маркерних системах доповненої реальності, аналіз основних існуючих типів AR-маркерів, розробка методу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. Використовуваними методами є: методи цифрової обробки зображень, теорії ймовірності, математичної статистики, криптографії та захисту інформації, математичний апарат теорії матриць. Отримані такі результати. Визначено, що однією з основних операцій у маркерних системах доповненої реальності є декодування маркерів у відео-потіці з метою вирізнення віртуальних об'єктів з реального світу. Розроблений метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. **Висновки.** Вперше отримано метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, із трансформованого зображення біт-контейнера будує матрицю бітів маркера, визначає зсув у повній матриці бітів, на основі застосування зворотної перестановки до повної матриці бітів реалізує фільтрацію пермутованого зображення. Напрямами подальших досліджень є розробка методу проектування віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності; розробка інформаційної технології використання мозаїчних стохастичних маркерів у системах доповненої реальності.

Ключові слова: маркер, код, доповнена реальність, віртуальна реальність, моделі, методи, вимоги, зовнішній вплив, робастність, виявлення, декодування.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Відомо [1, 2], що доповнена реальність базується на візуальних маркерах та передбачає використання камери та спеціальних візуальних маркерів, наприклад QR-код (quick response code – код швидкого відгуку). В [3] запропоновано новий тип маркерів доповненої реальності. Однією з основних операцій у маркерних системах доповненої реальності є декодування маркерів у відео-потіці з метою вирізнення віртуальних об'єктів з реального світу. При цьому суттєвим є визначення положення та орієнтації камери, яке визначається засобами комп'ютерного бачення [3, 4].

Мета статті – розробка методу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні існуючі типи AR-маркерів наведені в [1, 2, 5, 6, 7]:

– шаблонні (template markers) – чорно-білі маркери, які мають просте зображення всередині чорної рамки;

– 2D штрих-кодові (barcode markers) – маркери, що складаються з чорно-білих клітинок, які побітово кодують дані, і, іноді, рамки або області синхронізації. Найчастіше в якості штрих-кодових AR-маркерів використовують QR-коди;

– колові (circular markers) – аналогічно до штрих-кодових маркерів, тільки біти кодуються не прямокутними клітинками, а чорно-білими круговими секторами;

– зображення (image markers) – в якості маркерів використовуються звичайні кольорові зображення. Можуть містити рамку або інші орієнтири для виявлення та знаходження положення. Маркери-зображення зазвичай ідентифікуються за допомогою по-

шуку по шаблону або по особливостях зображення.

В [3] запропонований новий тип мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, вид якого наведений на рис. 1.

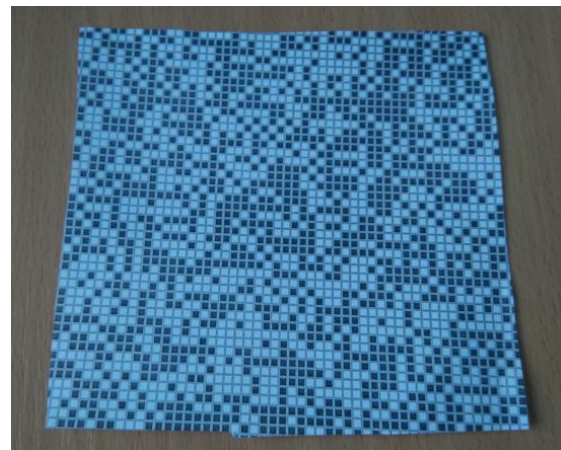


Рис. 1. Мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності

Отже, розробимо метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності.

Основна частина

Для декодування маркера необхідно вирішити задачу визначення кількості рядків і стовпців у робочій області, що зручно зробити по трансформованому зображенню маски AR-коду (рис. 1) [8].

Для цього визначимо функції:

$$S_1(x) = \frac{1}{h} \sum_y b_{x,y}, \quad (1, a)$$

$$S_2(y) = \frac{1}{w} \sum_x b_{x,y}, \quad (1, б)$$

де w, h – довжина і ширина зображення b відповідно.

Так, щоб визначити кількість стовпців W , необхідно порахувати кількість перетинів знизу вгору функцією $S_1(x)$ лінії порога $Q_1(x)$; аналогічно для визначення кількості рядків H порахуємо кількість перетинів знизу вгору функцією $S_2(y)$ лінії порога $Q_2(y)$ (рис. 2):

$$W = \sum_x \frac{d}{dx} \text{sign}(S_1(x) - Q_1(x)), \quad (2, a)$$

$$H = \sum_y \frac{d}{dy} \text{sign}(S_2(y) - Q_2(y)), \quad (2, б)$$

де $\text{sign}(x)$ – функція, що повертає знак числа x .

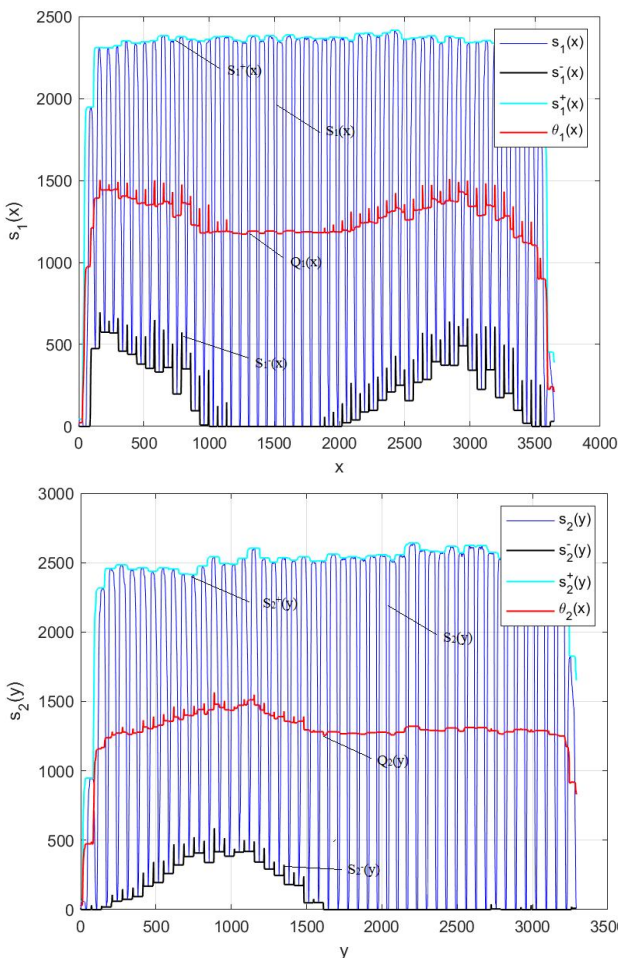


Рис. 2. Графіки функцій $S_{1,2}$ з огинаючими і порогами

Пропонується функції порогів $Q_{1,2}$ визначати як середнє між верхньою і нижньою огинаючими відповідних функцій $S_{1,2}$:

$$Q_{1,2} = (S_{1,2}^+ + S_{1,2}^-) / 2, \quad (3)$$

де верхні огинаючі $S_{1,2}^+$ знаходяться за допомогою операції морфологічного розширення по відрізку довжиною a (що еквівалентно локальному максимуму по цьому відрізку):

$$S_{1,2}^+ = \max_a S_{1,2} \quad (4)$$

Аналогічно, нижні огинаючі $S_{1,2}^-$ знаходяться за допомогою операції морфологічного звуження по відрізку довжиною a (що еквівалентно локальному мінімуму по цьому відрізку):

$$S_{1,2}^- = \min_a S_{1,2} \quad (5)$$

У даній роботі прийнято $a = 63$. Зробивши геометричну трансформацію біт-контейнера і визначивши H, W , ми можемо заповнити матрицю біт-контейнера $\gamma_{m,n}$ значеннями бітів:

$$\gamma_{m(y),n(x)} = g'(y,x), \quad (6)$$

де $g'(y,x)$ – трансформоване зображення біт-контейнера, а індекси m, n є функціями відповідних координат x, y і розраховуються як:

$$m(y) = \left\lfloor \frac{y - \min y}{\max y - \min y} (H - 1) \right\rfloor + 1, \quad (7, a)$$

$$n(x) = \left\lfloor \frac{x - \min x}{\max x - \min x} (W - 1) \right\rfloor + 1, \quad (7, б)$$

де $\lfloor x \rfloor$ – функція округлення знизу.

Заповнена матриця біт-контейнера показана на рис. 3, при цьому значення бітів 1 кодується білим кольором, бітів 0 – сірим кольором, а невизначені значення (відсутні клітинки) – чорним.



Рис. 3. Заповнена матриця біт-контейнера

На даному етапі ми маємо вже заповнену матрицю біт-контейнера γ , але, оскільки для обробки міг бути представлений тільки фрагмент зображення, матриця біт-контейнера може визначитися меншого розміру і ми повинні визначити положення заповненої матриці у матриці повного розміру Γ (в нашому випадку її розмір 63×63). Недостаючі значення, як і раніше, заповнимо 0.

Для вирішення цієї задачі основна ідея є така: переберемо послідовно всі можливі способи вписати існуючий фрагмент у матрицю повного розміру, після чого проведемо декодування (інверсну перес-

тановку) і для декодованої матриці порахуємо деяку функцію, що має різкий екстремум для правильно дешифрованих зображень (аналогічно до попереднього розділу).

Оскільки у правильно декодованому зображенні його пікселі будуть суттєво корельованими, то наша функція повинна приймати екстремальні значення для цього випадку.

Положення матриці біт-контейнера знаходиться з умови мінімуму цільової функції:

$$\{m_0, n_0\} = \arg \min_{m,n} S(\hat{P}^{-1} \Gamma). \quad (8)$$

В якості такої функції можемо взяти:

$$S(\hat{P}^{-1} \Gamma) = \frac{1}{4} \left\langle \left| \nabla \hat{P}^{-1} \Gamma \right|^2 \right\rangle, \quad (9)$$

де \hat{P}^{-1} означає інверсну перестановку, трикутні дужки $\langle \dots \rangle$ позначають операцію усереднення, а коефіцієнт 1/4 введено з міркувань зручності.

В даному випадку мінімум знаходиться в точці (7, 6), що відповідає індексам розташування верхнього лівого матриці кута біт-контейнера у повній матриці.

Тоді повна матриця біт-контейнера заповнюється як:

$$\Gamma_{m+m_0-1, n+n_0-1} = \gamma_{m,n}, \quad (10)$$

На рис. 4 показано графік цільової функції для всіх можливих положень, на рис. 5 – повна матриця біт-контейнера.

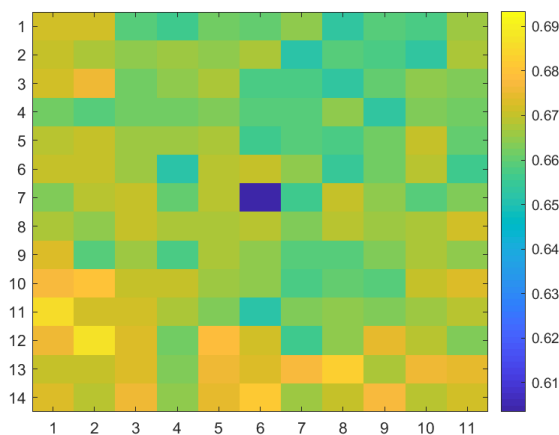


Рис. 4. Графік цільової функції для всіх можливих положень

Декодування повної матриці біт-контейнера Γ проводиться за допомогою інверсної псевдовипадкової перестановки \hat{P}^{-1} (вважаємо, що вона відома):

$$G = \hat{P}^{-1}(\Gamma), \quad (11)$$

Наступним етапом проводиться заповнення невизначених пікселів. Ця операція проводиться для кожного блоку розміром 3x3 пікселі, значення блоку присвоюється біту, що зустрічається найчастіше (0 елементи до розгляду не беруться).

Це виконується за допомогою λ -функції (у MATLAB-нотації):

$$fun = @(x) mode(x(x > 0)), \quad (12)$$

де $mode(x)$ – функція, що повертає моду послідовності x (елемент послідовності, що зустрічається найчастіше).



Рис. 5. Повна матриця біт-контейнера

Результат застосування інверсної псевдовипадкової перестановки до повної матриці біт-контейнера представлено на рис. 6.



Рис. 6. Результат застосування інверсної псевдовипадкової перестановки до повної матриці біт-контейнера

Кінцевий результат декодування маркера представлено на рис. 7, всі біти, не зважаючи на досить значну частину пропусків (див. рис. 5), відновлено правильно.

Таким чином, вперше отримано метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розмір матриці бітів маркера, із трансформованого зображення біт-контейнера буде матрицю бітів маркера, визначає зсув у повній

матриці бітів, на основі застосування зворотної перестановки до повної матриці бітів реалізує фільтрацію перматованого зображення.

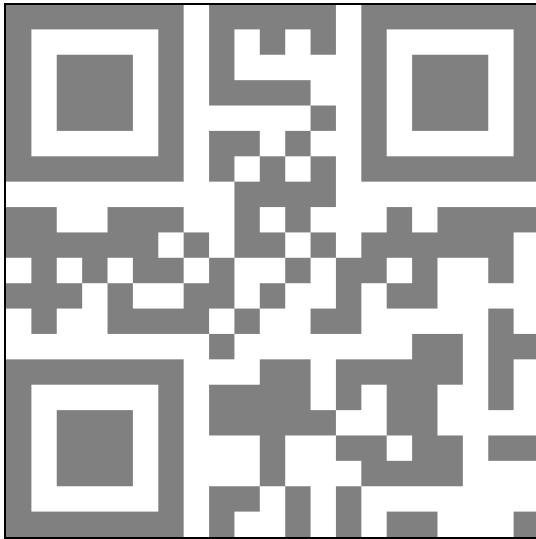


Рис. 7. Кінцевий результат декодування маркера

Висновки і напрями подальших досліджень

Встановлено, що однією з основних операцій у маркерних системах доповненої реальності є декодування маркерів у відео-потіці з метою вирізнення віртуальних об'єктів з реального світу.

Вперше отримано метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, із трансформованого зображення біт-контейнера будує матрицю бітів маркера, визначає зсув у повній матриці бітів, на основі застосування зворотної перестановки до повної матриці бітів реалізує фільтрацію перматованого зображення.

Напрямами подальших досліджень є:

розробка методу проектування віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності;

розробка інформаційної технології використання мозаїчних стохастичних маркерів у системах доповненої реальності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Facebook Research. AR/VR-Facebook Research. 2019 // [Electronic resource] – URL: <https://research.fb.com/category/augmented-reality-virtual-reality>.
2. Siltanen, Theory and applications of marker-based augmented reality / S.Siltanen // Espoo 2012 – 2012. – 198 p.
3. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності / О. М. Маковейчук // Сучасні інформаційні системи. — 2019. — Том. 3. — № 3. — С. 43–48.
4. Lowe, David G. Object recognition from local scale-invariant features. //Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2 – 1999 – P. 1150–1157.
5. Форсайт А.Д., Компьютерное зрение. Современный подход / Форсайт А. Д., Понс Ж. // Компьютерное зрение. Современный подход. – 2004. – 928 с.
6. Hartley R., Multiple View Geometry in Computer Vision / Hartley R., Zisserman S. // Cambridge University Press New York, NY, USA – 2003. – 655 p.
7. Маковейчук О. М. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок / О. М. Маковейчук, І. В. Рубан, Г. В. Худов // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2019. — № 4 (56).
8. Adobe Blog. The 10 VR Trends We'll See in 2018, 2019 // [Electronic resource] – URL: <https://theblog.adobe.com/10-vrtrends-well-see-2018/>.

Received (Надійшла) 31.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.11.2019

Decoding Method for Mosaic Stochastic Augmented Reality Marker

O. Makoveychuk

Abstract. The **subject matter** of the article is the augmented reality markers. The **goal** is to develop a method for decoding a mosaic stochastic augmented reality marker. The **tasks** are: analysis of basic operations in marker systems of augmented reality, analysis of the main existing types of AR-markers, development of a method for decoding a mosaic stochastic marker of augmented reality. The **methods** used are: methods of digital image processing, probability theory, mathematical statistics, cryptography and information protection, the mathematical apparatus of matrix theory. The following **results** are obtained. It is determined that one of the main operations in marker systems of augmented reality is the decoding of markers in a video stream in order to extract virtual objects from the real world. A method for decoding a mosaic stochastic augmented reality marker has been developed. **Conclusions.** For the first time, a decoding method for a mosaic stochastic augmented reality marker has been obtained. In which on the basis of the proposed system of indicators determines the size of the matrix of bits of the marker. From a transformed image of a bit container, it builds a matrix of marker bits. Defines the offset in the full matrix of bits. Based on the application of reverse permutation in the full matrix of bits, it implements filtering of a permuted image. The directions of further research are the development of a method for designing virtual objects on the plane of the augmented reality marker; development of information technology for using mosaic stochastic markers in augmented reality systems.

Keywords: marker, code, augmented reality, virtual reality, models, methods, requirements, external influence, robustness, identification, decoding.

Є. В. Мелешко, В. Д. Хох, В. В. Босько

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТРИЧНИХ ФАКТОРИЗАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Анотація. Об'єктом дослідження є процес створення списків рекомендацій відвідувачам веб-сайтів. Метою даної роботи є дослідження існуючих матричних факторизаційних моделей рекомендаційних систем. У рекомендаційних системах факторизація застосовується до матриці рейтингів з метою виявлення прихованих факторів, властивих об'єктам системи, що впливають на вподобання користувачів. Матричні факторизаційні моделі рекомендаційних систем досить популярні серед розробників та мають багато модифікацій. У даній роботі розглянуто наступні моделі: FunkSVD, SVD++, Asymmetric SVD та timeSVD. Факторизаційні моделі рекомендаційних систем використовуються у методах колаборативної фільтрації на рівні з моделями на основі сусідства. На відміну від моделей на основі сусідства, які використовують коефіцієнти подоби для створення списків рекомендацій, дані моделі використовують не подобу, а приховані фактори. Перевагами таких моделей є підвищена, порівняно з іншими моделями, робастність до атак ін'єкцією профілів та висока точність прогнозування вподобань користувачів. До недоліків досліджуваних моделей слід віднести погану масштабованість, довгий час навчання, а також необхідність повного перенавчання системи при появі нових даних, що частково вирішено лише у асиметричному SVD. Проведене дослідження показало, що існуючі моделі матричної факторизації дають можливість використовувати як явні зворотні зв'язки від користувачів (рейтинги об'єктів, виставлені користувачами), так і неявні зворотні зв'язки (перегляди об'єктів, написані коментарі, тощо), що дозволяє підвищувати точність роботи рекомендаційної системи на веб-ресурсах, де користувачі залишають багато неявного зворотного зв'язку. Такий принцип вперше був реалізований у SVD++. Факторизаційні моделі дозволяють також враховувати неперіодичні та періодичні зміни вподобань користувачів у часі, що, зокрема, реалізовано у timeSVD.

Ключові слова: рекомендаційні системи, матрична факторизація, SVD, приховані фактори, градієнтний спуск, прогнозування.

Вступ

На сьогоднішній день, при побудові рекомендаційних систем (РС) на основі колаборативної фільтрації, часто застосовують матричні факторизаційні моделі (МФМ) вподобань користувачів [1].

На відміну від моделей РС на основі сусідства, які використовують коефіцієнти подоби для створення списків рекомендацій, факторизаційні моделі виявляють та використовують приховані фактори (ПФ), що впливають на вподобання користувачів [1-3].

Факторизація – це процес декомпозиції об'єкту (зокрема, матриці) в набір інших об'єктів (факторів), добуток яких дає початковий об'єкт [4]. Факторизація дозволяє виділити ключові компоненти об'єкту факторизації.

У РС факторизація застосовується до матриці рейтингів з метою виявлення прихованих факторів, властивих об'єктам системи, що впливають на вподобання користувачів.

Метою даної роботи є дослідження існуючих матричних факторизаційних моделей для РС.

Найбільш відомими МФМ є FunkSVD, SVD++, Asymmetric SVD, timeSVD [1, 5-10]. Усі ці моделі одержали назву від методу факторизації матриць (ФМ) Singular value decomposition (сингулярний розклад матриць), хоча безпосередньо його вони не використовують, а лише засновані на спільній з ним ідеї – одержати для певної матриці деякі матриці, добуток яких дасть матрицю наближену до початкової.

У випадку з матрицями рейтингів, ця одержана наближена матриця буде містити наближені дані у

відомих рейтингах, а в комітках, де в початковій матриці рейтинги були невідомі, з'являться прогнозовані рейтинги.

Перша МФМ РС була запропонована Сімоном Фанком під час конкурсу від Netflix у 2006. У своїй публікації у власному блозі [5], Фанк визначив матрицю рейтингу користувача-об'єкта як добуток двох матриць пониженого рангу, перша – рядки прихованих факторів для користувачів, а друга – стовпчики прихованих факторів для об'єктів. Множення рядка користувача на стовпчик об'єкта дає прогнозований рейтинг для відповідної пари користувач-об'єкт.

Усі наступні матричні факторизаційні моделі є покращеними модифікаціями моделі FunkSVD.

Основний матеріал

Матричні факторизаційні моделі РС засновані на ідеї факторизації матриці рейтингів для виявлення та використання прихованих факторів, які впливають на вподобання користувачів. Приховані фактори дозволяють заповнити відсутні у матриці рейтинги комірки, тобто прогнозувати рейтинги.

Основна ідея факторизації матриць рейтингів рекомендаційної системи зображена на рис. 1.

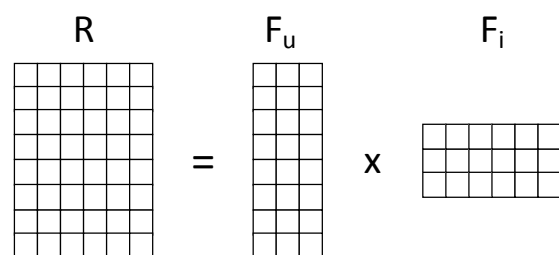


Рис. 1. Принцип факторизації матриці рейтингів

Матриця рейтингів R розмірності $n \times m$, де n – кількість користувачів, m – кількість об'єктів, факторизується на дві матриці: матрицю ПФ користувачів F_u , розмірності $n \times k$, де k – кількість ПФ, та матрицю ПФ об'єктів F_i , розмірності $k \times m$.

Загальний алгоритм ФМ рейтингів:

1. Ініціалізуємо матриці F_u та F_i випадковими значеннями.

2. Перемножуємо матриці F_u та F_i і порівнюємо результат з R , обчислюємо помилки.

3. Мінімізуємо помилки за допомогою деякого алгоритму машинного навчання (напр., градієнтного спуску, методу найменших квадратів, тощо).

Розглянемо конкретні реалізації даного загального принципу факторизації матриці рейтингів.

FunkSVD. Найперша модель рекомендаційних систем, що застосовує матричну факторизацію [5].

Дана модель полягає у наступному.

Спочатку треба визначити базові предиктори (зміщення) $b_{u,i}$, які складаються з базових предикторів окремих користувачів b_u і базових предикторів окремих об'єктів b_i , а також просто загального середнього рейтингу об'єктів у системі μ :

$$b_{u,i} = \mu + b_u + b_i. \quad (1)$$

Для прогнозування оцінки для пари користувач-об'єкт використовується така формула:

$$\hat{r}_{u,i} = \mu + b_u + b_i + q_i \cdot p_u. \quad (2)$$

де q_i – вектор факторів об'єкту i , а p_u – вектор факторів користувача u .

На початку роботи алгоритму треба обчислити глобальну середню оцінку та усі предиктори.

Потім треба знайти найкращі предиктори та фактори, що дозволяють прогнозувати рейтинги з найменшою помилкою.

Для визначення помилки використовується сума квадратів відхилень:

$$E = \sum_{(u,i) \in D} (r_{u,i} - \hat{r}_{u,i})^2, \quad (3)$$

$$E = \sum_{(u,i) \in D} (r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - q_i \cdot p_u)^2, \quad (4)$$

де $r_{u,i}$ – справжній рейтинг об'єкту i у користувача u ; $\hat{r}_{u,i}$ – прогнозований рейтинг.

Дана функція оптимізується градієнтним спуском, беруться часткові похідні по кожному аргументу, а рух під час градієнтного спуску відбувається у сторону зворотного напрямку цих похідних. Для одержання адекватних результатів при роботі з реальними даними необхідно враховувати ймовірність оверфітінгу [11, 12] (перенавчання системи) та виконувати регуляризацію [11, 13], щоб подолати дану проблему.

Регуляризація – додавання деякої додаткової інформації, щоб знайти рішення некоректно поставленої задачі, або щоб уникнути перенавчання.

Загалом регуляризуючий вираз $R(f)$ додається до значення помилки, перед тим як визначати аргумент, що дає найменше значення помилки:

$$f^* = \arg \min_f \sum_{i=1}^n E(f(\hat{x}_i), \hat{y}_i) + \lambda \cdot R(f), \quad (5)$$

де E – функція, що визначає похибку передбачення $f(x)$ для значень y , а параметр λ визначає важливість доданка для регуляризації. Зазвичай $R(f)$ визначається як штраф за складність функції f . Зокрема, поняття складності включає обмеження на гладкість та на норму векторного простору.

В FunkSVD оптимізаційний вираз можна записати таким чином:

$$\begin{aligned} & b^*, q^*, p^* = \\ & = \arg \min_{b, q, p} \sum_{(u,i)} (r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - q_i \cdot p_u)^2 + \\ & + \lambda \left(\sum_u b_u^2 + \sum_i b_i^2 + \|q_i\|^2 + \|p_u\|^2 \right), \end{aligned} \quad (6)$$

де λ – параметр регуляризації.

Якщо взяти від (6) часткові похідні по кожній із змінних, що оптимізуються, отримаємо прості правила для градієнтного спуску.

Під час градієнтного спуску у FunkSVD використовуються наступні правила для оптимізації змінних, що впливають на результат:

$$b_u = b_u + \gamma (e_{u,i} - \lambda b_u), \quad (7)$$

$$b_i = b_i + \gamma (e_{u,i} - \lambda b_i), \quad (8)$$

$$q_{i,k} = q_{i,k} + \gamma (e_{u,i} \cdot p_{u,k} - \lambda q_{i,k}), \quad (9)$$

$$p_{u,k} = p_{u,k} + \gamma (e_{u,i} \cdot q_{i,k} - \lambda p_{u,k}), \quad (10)$$

де $e_{u,i} = r_{u,i} - \hat{r}_{u,i}$ – помилка на наборі даних для навчання; γ – швидкість навчання.

Можна очікувати більшої точності, виділивши окремі швидкості навчання γ_n і регуляризації λ_n для кожного типу досліджуваного параметра. Так, напр., рекомендується використовувати різні швидкості навчання для зсувів користувачів, зсувів об'єктів і самих факторів.

Важливо, що при такому підході невідомо, які саме характеристики об'єктів відповідають факторам. Тому дані моделі є неінтерпретуваними.

SVD++. Відрізняється від FunkSVD тим, що крім рейтингів (явного зворотного зв'язку від користувача) використовує також неявну інформацію про вподобання користувачів, напр., перегляди об'єктів, написання коментарів, тощо [6, 7].

Точність прогнозування у SVD++ поліпшується за рахунок врахування неявного зворотного зв'язку, який забезпечує додаткову індикацію вподобань користувачів. Це особливо корисно для тих користувачів, які надали більше неявного зворотного зв'язку, ніж явного.

Для врахування неявного зворотного зв'язку (одного типу) від користувачів використовується другий набір факторів об'єктів, що пов'язує кожен об'єкт із вектором факторів $y_i \in R(u)$. Ці нові фактори об'єктів використовуються для характеристики користувачів на основі набору об'єктів, які вони неявно оцінили. У такій моделі рейтинги прогнозуються наступним чином:

$$\hat{r}_{u,i} = \mu + b_u + b_i + q_i \times \left(p_u + |R(u)|^{-1/2} \sum_{j \in R(u)} y_j \right). \quad (11)$$

Набір $R(u)$ містить усі об'єкти, що були неявно оцінені користувачем u .

Характеристики користувача u моделюються як

$$p_u + |R(u)|^{-1/2} \sum_{j \in R(u)} y_j.$$

Оскільки y_j – центровані навколо нуля (регуляризацією), сума нормалізується на $|R(u)|^{-1/2}$, щоб стабілізувати її дисперсію в межах діапазону спостережуваних значень $|R(u)|$.

Параметри моделі визначаються шляхом мінімізації відповідної регуляризованої квадратичної функції помилок за допомогою стохастичного градієнтного спуску. Оптимізація змінних, що впливають на результат прогнозу, обчислюється таким чином:

$$b_u = b_u + \gamma(e_{u,i} - \lambda_1 b_u), \quad (12)$$

$$b_i = b_i + \gamma(e_{u,i} - \lambda_1 b_i), \quad (13)$$

$$q_{i,k} = q_{i,k} + \gamma \times \left(e_{u,i} \cdot \left(p_{u,k} + |R(u)|^{-1/2} \sum_{j \in R(u)} y_j \right) - \lambda_2 q_{i,k} \right), \quad (14)$$

$$p_{u,k} = p_{u,k} + \gamma(e_{u,i} \cdot q_{i,k} - \lambda_2 p_{u,k}), \quad (15)$$

$$\forall j \in R(u): y_j \leftarrow y_j + \gamma(e_{u,i} \cdot |R(u)|^{-1/2} q_{i,k} - \lambda_2 y_j), \quad (16)$$

Можна враховувати і декілька типів неявного зворотного зв'язку. Напр., якщо користувач u має два типи неявного оцінювання об'єктів: додавання в обране $N_1(u)$ та перегляд сторінки $N_2(u)$, тоді рейтинги можна прогнозувати таким чином:

$$\hat{r}_{u,i} = \mu + b_u + b_i + q_i \times \left(p_u + |N_1(u)|^{-1/2} \sum_{j \in N_1(u)} y_{1j} + |N_2(u)|^{-1/2} \sum_{j \in N_2(u)} y_{2j} \right). \quad (17)$$

Відносна важливість кожного джерела неявного зворотного зв'язку буде автоматично визначена алгоритмом шляхом встановлення відповідних значень параметрів моделі.

Asymmetric SVD. Асиметричний SVD дозволяє додавати до моделі нових користувачів з декількома рейтингами, без необхідності перенавчати всю модель [8, 9]. При додаванні нового користувача, його приховані фактори обчислюються наступним чином:

$$p_{u,k} = \sigma \left(b + \sum_{j \in R(u)} w_{uj} \cdot s_j \right), \quad (18)$$

де σ – сигмоїдна функція:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}};$$

r_{ij} рейтинг, який користувач u поставив об'єкту j ; $R(u)$ – множина об'єктів, оцінених користувачем u , з відомими рейтингами; w, b, s – параметри, що шукаються градієнтним спуском.

Якщо необхідно використовувати неявні зворотні зв'язки, тоді для Asymmetric SVD можна застосувати наступну формулу:

$$p_{u,k} = |R(u)|^{-1/2} \sum_{j \in R(u)} r'_{u,j} \cdot s_j, \quad (19)$$

$$\text{де } r'_{u,j} = r_{i,j} - (\mu + b_u + b_i);$$

r_{ij} рейтинг, який користувач u поставив об'єкту j ; $R(u)$ – множина об'єктів, оцінених користувачем u , з відомими рейтингами; μ, b, s параметри, що шукаються градієнтним спуском.

TimeSVD++. Це факторизаційна модель з врахуванням часу [10]. Вподобання користувачів можуть залежати від часу, саме це враховує дана модель.

Популярність товару може змінюватися з часом. Це можна врахувати, трактуючи зміщення об'єкту b_i як функцію часу. Користувачі з часом можуть змінювати свої вподобання. Це можна також врахувати, прийнявши зміщення користувача b_u як функцію часу. Тоді базові предиктори будуть розраховуватися наступним чином:

$$b_{u,i} = \mu + b_u(t_{u,i}) + b_i(t_{u,i}). \quad (20)$$

Тут, $b_u(t_{u,i})$ та $b_i(t_{u,i})$ – реальні функції, які змінюються з часом. Точний спосіб побудови цих функцій повинен відображати розумний спосіб параметризації задіяних часових змін. Напр., у випадку рейтингу фільму очікується, що прихильність до фільму щодня трохи коливатиметься, а сильно змінюватиметься протягом більш тривалих періодів. З іншого боку вподобання користувачів можуть змінюватися щодня, відображаючи природню для поведінки клієнтів мінливість.

Це вимагає обрання менших проміжків часу при моделюванні поведінки користувача та більших

проміжків часу для моделювання часових ефектів, пов'язаних з об'єктами.

Базові предиктори окремих об'єктів можна визначити за такою формулою:

$$b_i(t) = b_i + b_{i,Bin(t)}, \quad (21)$$

де b_i – незмінна у часі частина предиктору об'єкта; $b_{i,Bin(t)}$ – частина предиктору об'єкта, що змінюється у часі, $bin(t)$ – номер часового проміжку, на які поділені усі наявні для навчання системи дані.

Для параметризації часової поведінки користувача з різною складністю та точністю можна розглянути різні функції.

Простий спосіб моделювання використовує лінійну функцію для фіксації можливого поступового зміщення вподобань користувачів. Для кожного користувача u позначаємо середню дату рейтингу за допомогою t_u .

Тепер, якщо користувач оцінив фільм у момент часу t , то пов'язане з цим відхилення часу визначається як:

$$dev_u(t) = sign(t - t_u) \cdot |t - t_u|^\beta, \quad (22)$$

де $|t - t_u|$ вимірює кількість умовних часових одиниць (напр., днів) між датами t і t_u .

Значення β встановлюється шляхом перехресної перевірки.

Базові предиктори окремих користувачів можна визначити за допомогою формули (23) або (24).

$$b_i(t) = b_u + \alpha_u \cdot dev_u(t), \quad (23)$$

де α_u – параметр алгоритму, який слід визначити під час градієнтного спуску.

Ця проста лінійна модель для наближення поведінки користувача вимагає визначення двох параметрів b_u та α_u для кожного користувача.

Більш гнучку параметризацію пропонують сплайни. Нехай u є користувачем, пов'язаним з n_u рейтингами. Часові точки k_u розподілені рівномірно по датах рейтингів користувача u як ядра, які керують такою функцією:

$$b_i(t) = b_u + \frac{\sum_{l=1}^{k_u} e^{-\sigma|t-t_l^u|} b_{t_l^u}}{\sum_{l=1}^{k_u} e^{-\sigma|t-t_l^u|}}, \quad (24)$$

де параметри b_u та t_l асоціюються з контрольними точками (ядрами) і автоматично дізнаються з даних.

Таким чином, вподобання користувача формується як зважена в часі комбінація цих параметрів. Кількість ядер k_u , врівноважує гнучкість та ефективність обчислень. Постійна σ визначає плавність сплайну.

При використанні формул (21-23) для визначення базових предикторів, одержимо наступну формулу для запису оптимізаційного виразу:

$$b_{u^*}, b_{u,t^*}, b_{i^*}, b_{i,Bin(t)^*}, \bar{b}_{u^*} = \arg \min \sum_{(u,i)}^n \left(\begin{array}{l} r_{u,i} - m - b_u - \\ -\bar{b}_u dev_u(t_{u,i}) - \\ -b_{u,t} - b_i - b_{i,Bin(t)} \end{array} \right)^2 + \lambda (b_u^2 + \bar{b}_u^2 + b_{u,t}^2 + b_i^2 + b_{i,Bin(t)}^2), \quad (25)$$

Можна використовувати ту саму методологію для отримання більшої кількості часових ефектів. Напр., для фіксації періодичних ефектів. Деякі об'єкти можуть бути більш популярними в конкретні пори року або впродовж певних свят. Періодичні ефекти можна знайти і для користувача. Напр., користувач може мати різні схеми купівлі протягом вихідних у порівнянні з робочим тижнем. Спосіб моделювання таких періодичних ефектів – виділити параметр для комбінацій періодів часу з об'єктами або користувачами.

В такому разі базові предиктори можна розраховувати за наступними формулами:

$$b_i(t) = b_i + b_{i,Bin(t)} + b_{i,period(t)}, \quad (26)$$

$$b_u(t) = b_u + \alpha_u \cdot dev_u(t) + b_{u,t} + b_{u,period(t)}. \quad (27)$$

Приховані фактори користувачів для timeSVD без врахування періодичності, а лише з врахуванням зміщень у часі, можна визначити так:

$$p_{u,k}(t) = p_{u,k} + \alpha_{u,k} \cdot dev_u(t) + p_{u,k,t}, \quad (28)$$

$k = 1, \dots, f.$

Рейтинги у TimeSVD++ можна прогнозувати за наступною формулою:

$$\hat{r}_{u,i} = \mu + b_u(t) + b_i(t) + q_i \cdot \left(p_u(t) + |R(u)|^{-\frac{1}{2}} \sum_{j \in R(u)} y_j \right). \quad (29)$$

Отже, існує багато різних моделей поведінки користувача РС, заснованих на ФМ для визначення прихованих факторів. Усі вони успішно застосовуються на різних існуючих веб-ресурсах.

Перевагами таких моделей є висока робастність до атак та висока точність прогнозування вподобань. До недоліків слід віднести погану масштабованість, довгий час навчання, а також необхідність перенавчання РС при появі нових даних, цей останній недолік частково вирішено у Asymmetric SVD.

Висновки

Було проведено дослідження існуючих матричних факторизаційних моделей рекомендаційних систем. А саме були розглянуті наступні моделі: FunkSVD, SVD++, Asymmetric SVD та timeSVD.

МФМ дозволяють виявляти приховані фактори, що впливають на вподобання користувачів.

Дані моделі РС більш стійкі до атак ін'єкцією профілів, ніж, напр., моделі на основі сусідства з використанням коефіцієнтів подоби.

Крім явного зворотного зв'язку від користувача (рейтингів), факторизаційні моделі можуть також враховувати неявні зворотні зв'язки (перегляди, коментарі, додавання у вибране, тощо), що дозволяє підвищувати точність роботи системи. Такий принцип вперше був реалізований у SVD++.

Переважає більшість матричних факторизаційних моделей потребує при додаванні нових користувачів повного перенавчання усієї моделі. Безумовно це є недоліком та вимагає затрат великої кількості ресурсів та часу.

Тим не менше, цей недолік можна усунути, що реалізовано у Asymmetric SVD – дана модель дозволяє додавати нових користувачів без перенавчання усієї моделі, а лише визначати їх приховані фактори для інтеграції їх до моделі.

Факторизаційні моделі дозволяють враховувати неперіодичні та періодичні зміни вподобань користувачів у часі, що, зокрема, реалізовано у timeSVD.

Дані моделі підходять для РС, у яких існує багато параметрів у об'єктах, важливий захист від атак ін'єкцією профілів і немає високих вимог до масштабування системи, а також уже накопичена деяка статистика для попереднього навчання системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. "Recommender Systems Handbook" (2010) Editors Francesco Ricci, Lior Rokach, Bracha Shapira, Paul B. Kantor, 1st edition, New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 842 p., doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3>
2. Jones, M. (2013) "Recommender systems, Part 1. Introduction to approaches and algorithms. Learn about the concepts that underlie web recommendation engines", URL: https://www.ibm.com/developerworks/opensource/library/os-recommender1/index.html?s_tact=105agx99&s_cmp=cp
3. Meleshko, E.V., Semenov, S.G., Khokh, V.D. (2018) "Research of methods of building advisory systems on the internet", Academic Journal "Control, Navigation and Communication Systems", Issue 1(47), Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, pp. 131–136, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.1.131> (in Ukrainian)
4. Krupnik, I. (1992) "Decomposition of a monic matrix polynomial into a product of linear factors", Linear Algebra Appl, P. 239-242.
5. Funk, S. (2006) "Netflix Update: Try This at Home", URL: <https://sifter.org/~simon/journal/20061211.html>
6. Cao, J., Hu, H., Luo, T., Wang, J., Huang, M., Wang, K., Wu, Zhonghai, Zhang, X. (2015). "Distributed Design and Implementation of SVD++ Algorithm for E-commerce Personalized Recommender System", Communications in Computer and Information Science. 572. Springer Singapore. pp. 30-44. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0421-6_4
7. Jia, Ya. (2014) "Users' brands preference based on SVD++ in recommender systems", IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications. pp. 1175-1178. doi: <https://doi.org/10.1109/wartia.2014.6976489>
8. Koren, Y. (2008) "Factorization meets the neighborhood", Proceeding of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, doi: <https://doi.org/10.1145/1401890.1401944>
9. Töscher, A., Jährer, M., Bell, R.M. (2009) "The BigChaos Solution to the Netflix Grand Prize", Netflix prize documentation, URL: https://www.netflixprize.com/assets/GrandPrize2009_BPC_BigChaos.pdf
10. Koren, Ye. (2009) "Collaborative filtering with temporal dynamics", Proceeding KDD '09 Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, P. 447-456.
11. "Overfitting in machine learning: what it is and how to prevent it", (2017) URL: <https://elitedatascience.com/overfitting-in-machine-learning>
12. Brownlee, J. (2016) "Overfitting and underfitting with machine learning algorithms", URL: <https://machinelearningmastery.com/overfitting-and-underfitting-with-machine-learning-algorithms>
13. Neumaier, A. (1998) "Solving ill-conditioned and singular linear systems: A tutorial on regularization", SIAM Review 40, P. 636–666.

Received (Надійшла) 11.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.11.2019

The research of matrix factorization models of recommendation systems

Ye. Meleshko, V. Khokh, V. Bosko

Abstract. The subject matter of the article is the process of creating recommendation lists for website users. The goal is to research the existing matrix factorization models of recommendation systems. In recommendation systems, factorization is applied to a rating matrix in order to identify latent factors inherent in system objects that affect user preferences. Matrix factorization models of recommendation systems are very popular among developers and have many modifications. In this paper, the following models are considered: FunkSVD, SVD++, Asymmetric SVD, and timeSVD. Factorization models of recommender systems along with neighborhood models are used in collaborative filtering methods. Unlike neighborhood models, which use similarity coefficients for create lists of recommendations, factorization models do not use similarity, but latent factors. The advantages of such models are: increased robustness to attacks of profile-injection, in comparison with other models, and high accuracy in predicting user preferences. The disadvantages of the researched models include poor scalability, a long training time, and the need for a complete retraining of the system when new data appears, which is partially eliminated only in asymmetric SVD. The research showed that the existing matrix factorization models make it possible to use both explicit feedbacks from users (item ratings put up by users) and implicit feedbacks (views of items, comments, etc.), which allows to increase the accuracy of a recommendation system on web-resources where users give a lot of implicit feedback. This principle was first implemented in SVD++. Factorization models also allow taking into account non-periodic and periodic changes in user preferences over time, which, in particular, is implemented in timeSVD.

Keywords: recommendation systems, matrix factorization, SVD, latent factors, gradient descent, forecasting.

О. В. Мілов¹, М. Ю. Костяк², С. В. Мілевський¹, С. С. Погасій¹

¹ Харківський національний економічний університет, Харків, Україна

² Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ АГЕНТІВ В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. Аналізуються найбільш поширені засоби та підходи до моделювання поведінки агентів в інформаційно-комунікаційних системах. Зокрема розглянуті такі засоби як агентне моделювання, штучні нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми, підходи, засновані на знаннях, ланцюги Маркова і ін. Крім класичних засобів та підходів розглянуто також нові прикладні методи, а саме: людино-центрована система, аналіз відео, накопичувач даних, що керується даними, динамічні чинники. В результаті проведеного аналізу отримані висновки про поточний стан питань моделювання поведінки людини. Визначено, що існує значна кількість підходів, і всі вони мають свої переваги і недоліки. Тому неможливо визначити оптимальний підхід до моделювання поведінки людини, але можна визначити мету, для якої застосування того чи іншого підходу може бути рекомендовано. В роботі наведена схема з інформацією, із зазначенням можливих рішень для подолання обмежень різних підходів. Аналіз цих даних показав, що агентно-орієнтований підхід вирішує більшість проблем і знімає обмеження, характерні для інших методологій. Це підтверджується тим фактом, що агентне моделювання є гнучким підходом, який широко використовується в багатьох контекстах моделювання поведінки людини.

Ключові слова: засоби моделювання, поведінка людини, агентне моделювання, штучні нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми, підходи, засновані на знаннях, ланцюги Маркова.

Вступ

В останні роки вивчення моделювання поведінки людини було ознаменовано величезним зростанням інтересу з боку вчених в декількох областях застосування. З огляду на велику кількість сучасних методів моделювання поведінки людини (МПЛ), які можна застосувати для моделювання різних людських аспектів, необхідний огляд і порівняння різних методів, що застосовуються в даний час.

Основною метою подальшого аналізу є дослідження найбільш поширених підходів - агентного моделювання, штучних нейронних мереж, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів, підходів, заснованих на знаннях, ланцюгів Маркова і т. д., а також нових прикладних методів. Крім того, основні переваги та обмеження, пов'язані з реалізацією кожної аналізованої методології, повинні бути сформульовані таким чином, щоб забезпечити чітке розуміння того, які підходи є найбільш перспективними в моделювання поведінки людини в різних контекстах.

Засоби моделювання поведінки людини

Моделювання поведінки людини має величезний потенціал. Фактично, МПЛ знаходить застосування в багатьох областях, таких як боротьба зі стихійними лихами [1, 2], військові науки [3, 4] і виробництво [5, 6]. Останні досягнення (з точки зору досліджень і технологій) дозволяють вченим публікувати інноваційні та нові роботи на цю тему. Ясно, що моделювання поведінки людини (ПЛ) дуже складне, не тільки з точки зору невизначеності, яка впливає на дії людини, але також і для його суворої залежності від зовнішніх змінних (погода, взаємодії з іншими людьми і т. д.).

Основною перевагою МПЛ є можливість пом'якшувати помилки людей, задовольняти і передбачати їх потреби, допомагаючи їм в їх повсякден-

них діях [7]. Хоча такий сценарій може здатися фантастичним, практика МПЧ вже використовується сьогодні для прогнозування ПЧ під час евакуації, контролю людських реакцій під час водіння, відтворення соціальних взаємодій людей і так далі. Крім того, МПЧ може використовуватися і приносити значний ефект для прогнозування поведінки взаємодіючих сторін під час кіберконфліктів [8].

З середини 50-х до середини 90-х років вчені розробили кілька підходів до моделі ПЛ, які є вкрай привабливими при моделюванні поведінки взаємодіючих агентів в умовах кіберконфліктів.

Підхід, заснований на знаннях (knowledge-based approach - КВА). Важливим підходом МПЛ є підхід, заснований на знаннях (КВА). Застосування КВА складається не більше ніж з «простого» алгоритму IF-THEN. Застосування цієї ідеї до МПЛ означає, що КВА моделює поведінку людей, які стикаються з обмеженим числом ситуацій, і щоразу, коли відбувається щось з цього (модель з використанням «умови IF»), вони завжди відповідають заздалегідь заданим діям (вказіть в «ТОДІ операція»).

Ідеальна область застосування КВА характеризується високим ступенем стандартизації; де оператор виконує дії за замовчуванням [9].

Численні можливості виникають при використанні підходу, заснованого на знаннях: 1) можна використовувати як навчальний посібник для підвищення кваліфікації персоналу; 2) представляє собою ефективний спосіб отримання відповідей, так як не вимагає додаткового допоміжного персоналу; 3) модель, заснована на знаннях, може бути легко оновлена і розширена. З іншого боку, КВА має істотні недоліки. Вони залежать від статичності системи, заснованої на знаннях (KBS).

1. KBS не вчать на помилках, якщо тільки для користувача зворотний зв'язок і підтримка персоналу не є частиною його постійного розвитку;

2. KBS не враховує емоційні аспекти поведінки людини;

3. KBS не моделюють залежність від шляху досягнення мети;

4. Ухвалення рішення людиною (HDM) дуже складне, і, отже, неможливо точно описати його за допомогою простих і статичних алгоритмів IF-THEN.

І хоча деякі автори вважають, в цілому, КВА не підходить для додатків, пов'язаних з моделювання поведінки людини через численні обмеження, вважаю, що на вказаний підхід необхідно дивитися ширше і розглядати його адаптацію для різних контекстів, і в першу чергу для моделювання поведінки агентів в системах безпеки.

Агентно-орієнтоване моделювання. Підхід на основі агентного моделювання (ABM) можна описати одним словом: взаємодія. Взаємодія з іншими людьми - це коріння людського життя. ABM стає необхідним, коли система, яку ми повинні вивчати, є складною з точки зору взаємозалежності її компонентів. Підхід ABM заснований на концепції агента. В [10] зазначається, що не існує універсального визначення терміна «агент», хоча ряд характеристик є обов'язковим для загального визначення, наведеного в [11]. Вони представляють основні характеристики агента:

1. Автономія: агенти є автономними одиницями, і вони не залежать від інших об'єктів;

2. Неоднорідність: агенти відрізняються один від одного;

3. Активність: агенти надають незалежний вплив на модель;

4. Цілеорієнтованість: у агентів є мета, яку вони переслідують;

5. Реактивність/сприйнятливість: агенти усвідомлюють існування інших агентів, перешкод і навколишнього середовища;

6. Обмежена раціональність: агенти діють виключно на основі інформації, якою вони володіють;

7. Інтерактивність / комунікативність: агенти мають можливість спілкуватися з іншими агентами і / або середовищем, в якому вони функціонують;

8. Мобільність: агенти можуть переміщуватись в навколишньому середовищі;

9. Адаптація / навчання. Агенти можуть бути спроектовані так, щоб змінювати свій стан в залежності від їх поточного стану, дозволяючи їм адаптуватися. Адаптацію можна розглядати як процес навчання.

ABM є найбільш природним методом опису системи, що складається з поведінкових об'єктів [12]. Як було відзначено [13], агентне моделювання є гранично гнучким і може виступати в якості основного інструменту моделювання різних надзвичайних ситуацій (від кібератак до стихійного лиха). У цьому контексті в роботі [14] пояснюються можливі застосування ABM для управління надзвичайними ситуаціями. В [11] пропонується модель для моделювання людської поведінки, коли людям доводиться діяти в умовах надзвичайних ситуацій. Зазвичай в цьому додатку змодельовані агенти повинні захищатися і захищати наявні у них ресурси від змодельованих небезпечних подій.

льованих небезпечних подій.

Очевидно, що ABM має деякі обмеження. Дії і вибір людей часто обумовлені ірраціональністю, яка ускладнює реалізацію і розробку моделі поведінки. Крім того, за допомогою ABM неможливо моделювати емоційні аспекти людини, які на думку деяких авторів [15], є фундаментальні.

Ряд прикладів застосування, в яких деякі з обмежень були вирішені вище з точки зору математичного визначення і моделювання ABM емоційних аспектів людини (наприклад, страху, втоми, стресу і т. д.), можна знайти в [16-18]. Приклад застосування в нестандартних контекстах для ABM (культурної спадщини) можна знайти в [13-20].

Агентне моделювання - це метод, який вимірює вплив одного або декількох автономних агентів на конкретну систему. Агентне моделювання використовується для відтворення і прогнозування поведінки дуже складних алгоритмів з використанням дуже простої системи, заснованої на правилах. Агентне моделювання популярне в додатках, які демонструють рій-подібну поведінку, таку як поширення епідемії [21] або взаємодію натовпів людей в області [22]. Наприклад, люди в натовпі є агентами, і вони стежать за своєю швидкістю, положенням інших людей, і намагаються досягти своєї мети, яка є становищем в системі. Кожен агент просто намагається мінімізувати час, необхідний для досягнення своєї мети, однак інші агенти можуть заважати один одному. Потім в системі можна знайти вузькі місця, вивчивши області, в яких сповільнюється більшість агентів [23]. Нещодавно цю ж методологію і техніку застосували до області кібербезпеки, застосовуючи різні підходи до визначення агентів.

У [24] показано застосування агентної моделі для опису взаємодії бот-мереж при атаці розподіленої відмови в обслуговуванні (DDoS). Котенко змодельовав кроки і дії для успішного виконання DDoS-атаки, включаючи різних ініціалізованих агентів, необхідних для виконання моделювання. У цій роботі використовувалися два різних типи агентів: система атак зловмисника, що представляє собою автоматизовані ботнети, атакуючі систему, а потім система захисту, яка представляє собою системи виявлення вторгнень (IDS) і брандмауери. Для кожного типу агента був створений кінцевий автомат, щоб описати функціональність і поведінку агента. Для агента зловмисника кінцевий автомат складався з кроків і результатів семи різних методів виконання DDoS. З боку захисту агенти були навчені виконувати певні перевірки на різних рівнях мережевої моделі (системи, мережі та глобальної мережі) і повідомляти про свої висновки, незалежно від того, чи була виявлена шкідлива активність. Пізніше [25] було застосовано цю методологію до симулятора з використанням NS2 і середовища INET OMNeT++, де звичайні користувачі, зловмисники і захисники були змодельовані спільно, і вплив ботнету було перевірено в мережі. Було показано, що колективні атаки на основі команди були набагато більш успішними при проведенні комплексної DDoS-атаки на мережу, як можна було б передбачити.

У [26] описано інструмент виявлення і моделювання зловмисників на основі агента під назвою NeSSi2. Методологія полягала в тому, щоб моделювати всю мережу і зловмисників як агентів, щоб уникнути складних математичних моделей. Передбачено моделювання, яке може обробляти безліч різних типів сценаріїв, які нелегко виконати в реальних умовах. Кожна машина, маршрутизатор і брандмауер створюються як агенти в спробі виявити і ідентифікувати DoS-атаки в мережі. NeSSi2 підтримує два типи атак: сценарії поширення хробака, які аналогічні проблеми поширення епідемії, і атаки на основі ботнетів, як це було раніше. Кожен зловмисник також моделюється як агент, що вибирає одну з цих атак і виконує її в мережі. NeSSi2 імітує основний веб-трафік, такий як HTTP-запити і інші додатки, в надії, що поведінка зловмисника може бути ідентифікована в ході імітаційного моделювання.

Штучні нейронні мережі. Гарне визначення штучних нейронних мереж (ANN) дано в [27]. У цій роботі автори визначають ANN як «форму штучного інтелекту, яка намагається імітувати функцію людського мозку і нервової системи».

ANN мають чітко визначену структуру. [28] описує її як набір елементарних елементів, званих нейронами, одиницями, клітинами або вузлами. Кожен нейрон пов'язаний з іншими нейронами за допомогою спрямованих комунікаційних зв'язків зв'язків. Ваги (скалярне число) визначають силу зв'язків між взаємопов'язаними нейронами і надають інформацію, яка використовується ANN для розв'язання досліджуваної проблеми. ANN сильно пов'язані з проблематикою моделювання поведінки людини. Фактично, вони імітують функціонування людського мозку: від сприйняття навколишнього середовища на вході і створення дії на виході [29]. Це дуже важливо, тому що мозок являє двигун людських дій, і знання його прихованих процесів може бути корисним для розуміння принципів, що лежать в основі поведінки людини. На жаль, відтворення нервових процесів у людей дуже складне: воно являє собою проблему нейробіології - сучасної дисципліни, де вченим ще багато що належить відкрити.

Порівнюючи ANN з агентно-орієнтованим моделюванням, ми можемо помітити, що реалізація ANN складніша і вимагає більш тривалого часу роботи (ABM описується лінійними законами, ANN описуються принципово нелінійними законами). Нелінійності ANN дозволяють використовувати ANN в різних додатках для прогнозування безпосередніх дій людини [30], або в інтелектуальних середовищах (набір програмних і апаратних елементів, які підтримують інтелектуальну взаємодію між доквіллами і користувачами), як в [31].

На закінчення аналізу підходу ANN слід порівняти переваги і обмеження цього підходу. Переваги використання ANN [32]:

1. ANN може виконувати завдання, які лінійна програма не може: лінійні програми менш надійні, ніж нелінійні (такі як ANN).

2. ANNs часто демонструють патерни, подібні до тих, які демонструють люди.

3. Коли елемент нейронної мережі виходить з ладу, мережа може продовжувати працювати без будь-яких проблем із-за своєї паралельної природи.

4. ANN вчиться і не потребує перепрограмування.

З іншого боку, недоліками ANN є:

1. Обробка даних часових рядів в ANN - дуже складне питання.

2. Як тільки мережа була структурована для конкретного додатка, ця мережа готова до навчання. Можливий спосіб зробити це - вдатися до використання генетичних алгоритмів (ГА);

3. ANN передбачають складні операції і для цього використання їх для відносно простих випадків дуже дорого з точки зору часу обробки.

Нечітка логіка. Нечітка логіка використовувалася для обробки концепції часткової правдоподібності, де значення істини може варіюватися від повністю істинного до повністю помилкового з використанням десяткових чисел. Нечітку логіку можна розглядати як еволюцію традиційного бінарного підходу (також званого чітким підходом), коли конкретний стан моделі пов'язаний зі змінними, які можуть приймати тільки два значення (0 або 1). Використання нечіткої логіки рекомендується для моделювання явищ з високим ступенем невизначеності: характеризується неточною інформацією і невизначеними ситуаціями [33]. Моделювання людської поведінки є прикладом цього контексту, оскільки воно майже завжди відрізняється великою кількістю можливих виконуваних дій. У зазначеному контексті нечітка логіка використовується як інструмент для процесів прийняття рішень: вона дає нам значущі і потужне уявлення невизначеностей вимірювань, а також значущі уявлення невизначених понять, виражених природною мовою.

Деякі з найбільш важливих можливостей, що виникають при використанні нечіткої логіки, такі: 1) для вирішення складних проблем в нейронауках, оскільки вона нагадує людське мислення і прийняття рішень [34]; 2) застосування нечіткої логіки дуже легке в порівнянні з обчислювально точними системами [35]; 3) що моделі нечіткої логіки не надто чутливі до умов, що змінюються [35]; 4) нечітка логіка виявилася відповідним формалізмом для обробки неточних / розпливчастих і невизначених знань [36]. У [36] також визначаються деякі недоліки, такі як:

1. Нечіткі результати можна інтерпретувати декількома способами, що ускладнює аналіз:

2. Нечітке уявлення знань і даних вимагає великої кількості даних і досвіду для розробки нечіткої системи [37];

3. Використання нечіткої логіки часто може бути доцільним, коли обчислювальні обмеження потужності занадто суворі.

Крім того, деякі інші автори визначили інші важливі обмеження, такі як:

1. Нечіткий підхід заснований на стохастичних припущеннях [38];

2. Відрізняється від агентного моделювання. Вказується, що використання нечіткої логіки і не

допускає взаємодії між різними об'єктами, які представлені в моделі [39].

Нейро-нечітка логіка. Підхід нейро-нечіткої логіки є «межа взаєморозуміння» між штучними нейронними мережами і нечіткою логікою. Цей підхід охоплює основні аспекти двох методів. Нейро-нечітка логіка використовує теорію нечіткої логіки для опису невизначеностей, пов'язаних з поведінкою людини, в той час як використання ANN дозволяє моделювати важливі характеристики людини, такі як навчання, відмовостійкість адаптації, паралелізм і узагальнення. Нейро-нечітка логіка використовується в НВМ для подолання обмежень нечіткої логіки і ANN. В [40] описується використання її для обмеження невизначеності, пропонуючи модель, яка відтворює залежність поведінки людини від модифікації зовнішнього контексту (в тому числі навчальної спроможності ANN). Нейро-нечітка логіка має деякі цікаві характеристики:

1. Простота реалізації нечітких природних мов, так що структура знань дуже чітка і ефективна;
2. Будь-які зміни в задачі і середовищі можуть бути легко усунені шляхом адаптації ваги нейронів;
3. Оскільки нечітка система є одним з видів апроксимації, може бути досягнуто різке скорочення витрат на дані і програмне / апаратне забезпечення.

Важливо сказати, що нейро-нечіткий логічний підхід є широко обговорюваним методом в академічній сфері. Насправді, деякі вчені сумніваються в якості подібного підходу [41]. Зокрема, вчені досліджують сумісність між ANN і нечіткою логікою.

Генетичні алгоритми. Часто люди повинні одночасно досягати різних цілей. Ця ситуація не є традиційною для раніше описаних підходів і щоб подолати цю межу, можна використовувати підхід, пов'язаний з генетичними алгоритмами (ГА).

ГА натхненні еволюційною теорією Чарльза Дарвіна. Основні методи ГА призначені для імітації еволюційних процесів в реальному світі. В ГА безліч варіантів вирішення проблеми оптимізації розробляється в бік кращих рішень. Кожен варіант рішення має набір властивостей (званих хромосомами), які можуть бути змінені. ГА є хороший метод для моделювання поведінки людини. Дійсно, вони дозволяють моделювати ситуації, в яких учасники, реалізовані в досліджуваній моделі, повинні переслідувати різні цілі одночасно (багатоцільові проблеми). З цієї причини ГА могли б стати хорошим способом моделювання процесів прийняття рішень людиною (НВМ) для їх більшої прихильності реальності. Численні можливості виникають при використанні підходу ГА. Нижче представлені найважливіші особливості підходу :

1. ГА мають здатність запобігати потраплянню в локальні оптимальні рішення, на відміну від традиційних методів, які здійснюють пошук з однієї точки [43];
2. ГА дозволяють вирішувати завдання оптимізації, коли нам доводиться максимізувати / мінімізувати більше одного параметра [42];
3. Добре обробляються зашумлені / стохастичні цільові функції;

4. Велика кількість параметрів може бути проблемою для методів з використанням похідних [43].

З іншого боку, ГА також мають деякі обмеження:

1. ГА вирішують багатоцільові проблеми. В його типі моделей іноді досягнення оптимального рішення неможливе: оптимізація значення змінної може спричинити інший параметр, іншими словами вкрай важко рішення багатокритеріальних задач;

2. ГА, як правило, потребують представницької статистики, і потрібно обчислювальна генерація безлічі поколінь, перш ніж буде отримано гарний результат.

3. Рішення ГА строго залежать від фітнес-функції: погано спроектована фітнес-функція може привести до неоднозначних результатів.

Можливе застосування ГА в галузі управління знаннями представлено в [44], де пропонується застосовувати ГА для цієї мети. Заснований на генетиці людини генетичний алгоритм пропонується використовувати в різних контекстах, таких як мозковий штурм і управління інноваціями, щоб знайти краще рішення під час обговорення або кращу маркетингову стратегію нового продукту.

Марковські ланцюги. Можливе застосування ланцюгів Маркова в областях моделювання поведінки людини, зокрема, для прогнозування його реакцій з високою точністю. Формальне визначення ланцюга Маркова дається у [45]: "Процес ланцюга Маркова n -го порядку визначається набором з n станів $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ і набором ймовірностей переходів $p_{ij}, i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n$. Процес може бути тільки в одному стані в будь-який момент часу. Якщо в момент k процес знаходиться в стані x_i , то в момент часу $k+1$ він буде в змозі x_j , з ймовірністю p_{ij} ".

Поведінка людини може бути представлена марківськими ланцюгами в припущенні, що в певний момент індивідуум (α) знаходиться в початковому стані x_0 , пов'язаному з певною поведінкою. У цій ситуації α може виконувати обмежений діапазон дій $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Підхід ланцюга Маркова полягає в призначенні ймовірності, яка кількісно визначає ймовірність того, що α повинен переміститися з x_0 в загальний стан x_i , виконуючи певну операцію [46]. Така ж структура наведена у [47]. Аналіз публікацій по використанню ланцюгів Маркова дозволяє визначити основні переваги, які вони приносять в додатках моделювання поведінки людини:

1. Марковські моделі відносно легко вивести з послідовних даних;
2. Підхід ланцюгів Маркова має високу надійність;
3. Результати аналізу марківських моделей легко адаптується для графічного представлення;

З іншого боку, у підході Марківських ланцюгів також є деякі обмеження. Наприклад, ланцюжки Маркова засновані на невизначеності і наближених даних; вони не завжди можуть використовуватися для моделювання людських взаємодій, і вони не інтегрують навчання. Крім того, з враховуючи, що ланцюжки Маркова мають обмежений інтервал прогнозування [48], тому підхід може бути використа-

ний для визначення дії окремої людини протягом короткого періоду.

Онтології кібер-атак. Онтології кібератак описують відносини між кожним з факторів кібератак і їх залежностями один від одного. Наприклад, можна описати всі деталі вразливості, щоб це було можливо, наприклад, служби і ОС, призначені для користувача дозволу, аж до вимог зловмисника, таких як знання конкретної області. Онтологія може бути охарактеризована на низькому рівні, як конкретні вразливості або індивідуальну поведінку зловмисника, аж до дуже високого рівня, наприклад до намірів найвищого рівня зловмисника. У [49] застосовано методологію до кібер-області і описані вимоги онтології верхнього рівня кібер-атакуючого в три етапи. По-перше, всі атаки засновані на наміри, що означає, що для атаки повинна бути відповідна причина. По-друге, атаки відповідають відповіді домену противника. Це означає, що кожна атака залежить від результату атаки цільової мережі. Нарешті, намір атаки може бути представлено як сукупність піднамірів. Це опис багатоступеневих атак, де може пройти кілька кроків, перш ніж зловмисник зможе досягти своєї спільної мети.

У [50] описане використання, засноване на знаннях системи логічного аналізу штучного інтелекту SysSecure, щоб розробити базу знань про мережу для аналізу безпеки. Запустивши набір демонів Sys на хост-комп'ютерах в мережі, система SysSecure може розробити базову карту мережі, а потім онтології, розроблені експертами з безпеки, і обробку природної мови з різних наборів даних можуть використовуватися для аналізу мережі. SysSecure забезпечує підтримку більше 12 000 сервісів, 683 типів вразливостей, 354 типів програмних збоїв одночасно. Однак ці онтології все ще повинні бути розглянуті експертом з безпеки, і автори визнають, що кожна з онтологій вимагає 10-20 хвилин огляду. У [51] проаналізована зручність використання більш універсальною і загальною версією SysSecure, названою ResearchSys, і виявлено, що вона неорганізована, складна в використанні і негнучкість без експертних знань, що ускладнює її використання в дослідницьких цілях. Там не було ніякої відповіді на цей документ і ніякого подальшого прогресу на SysSecure, як було зроблено з тих пір.

Вираз інформації про структуровану загрозу (STIX) - це схема, розроблена для кращого опису інформації про кіберзагрози. Схема STIX охоплює концепції високого рівня, такі як спостережування / індикатори, інциденти, ТМП (тактика, методи і процедури), цілі, напрямки дій і суб'єкти загроз. Ця структура також визначає так звану «ланцюг кібервбивств», яка описує фази або кроки, які зловмисник зазвичай робить протягом всієї кампанії.

Важливі різні «сторони» атак, оскільки в залежності від того, на якій стороні знаходиться атакуючий, необхідно приймати різні захисні заходи. Ліва сторона ланцюга вбивств являє собою підготовчу фазу атаки, де можуть використовуватися превентивні захисні прийоми, щоб перешкодити прогресу атакуючого. Аналогічно, якщо зловмисник знахо-

диться на правій стороні атаки, зловмисник якимось чином скомпрометував мету, і стратегію захисту перемикається на фокус управління втратою замість превентивних методів. STIX фокусується на окремих кампаніях атаки і організовує його для подання атаки і позиції ланцюжка знищення за допомогою інструментів, які використовував суб'єкт загрози, методів / поведінки, які вони демонструють, взаємодії між суб'єктами загрози і спостережуваних.

Сучасні підходи до моделювання поведінки людини. З 2013 року різні вчені розробляють нові і цікаві методології. В якості основних сучасних підходів можна виділити наступні п'ять:

1. Ambient Intelligence (Ami) [52]: Ambient Intelligence (Ami) - це нова дисципліна в області інформаційних технологій, в якій люди отримують можливість працювати в цифровому середовищі, що складається в основному зі складного програмного забезпечення і пристроїв (датчиків і виконавчих механізмів), з'єднаних через мережу;

2. Накопичувач даних, що керується даними [53]: підхід полягає в моделюванні поведінки людини з використанням даних, зібраних з мобільних телефонів. Використання підходу, заснованого на даних, досліджує особистість людей, чого немає у інших методах моделювання поведінки людини;

3. Динамічні чинники [54]. Цей підхід пропонує кращу модель поведінки евакуйованих, ніж традиційні методи, які не враховують в достатній мірі численні динамічні фактори, які могли б суттєво вплинути на рішення про евакуацію людей. Важливо підкреслити, що підхід «Динамічні чинники» застосовувався тільки для евакуації і потребує поліпшення, що дозволить зробити його придатним в інших контекстах;

4. Людино-центрована система (HCS) [15]: головна перевага HCS полягає в тому, що вона враховує психологічні, індивідуальні та соціальні фактори, на відміну від інших традиційних підходів, але метод ще не набув достатнього підтвердження;

5. Аналіз відео [55]: підхід автоматичного візуального виявлення, є аналіз з використанням систем захоплення відео, таких як відеоспостереження. Можливо використовувати відеоаналіз як інструмент для збору інформації для побудови моделей.

В результаті проведеного аналізу можна зробити висновки про поточний стан питань моделювання поведінки людини: по-перше, існує значна кількість підходів, і всі вони мають свої переваги і недоліки. З цього ясно, що неможливо визначити оптимальний підхід до моделювання поведінки людини. Проте, можна визначити мету, для якої застосування конкретного підходу може бути рекомендовано. У таблиці 1 представлена схема з цією інформацією, із зазначенням можливих рішень для подолання обмежень різних підходів. Аналіз цих даних показує, що агентно-орієнтований підхід вирішує більшість проблем і знімає обмеження, характерні для інших методологій. Це підтверджується тим фактом, що агентне моделювання є гнучким підходом, який широко використовується в багатьох різних контекстах.

Таблиця 1-Традиційні підходи моделювання поведінки людини - синтетичний опис

Підхід	Контекст використання	Відповідні переваги	Відповідні обмеження	Рішення для подолання обмежень
Агентно-орієнтоване моделювання	Контексти, де є люди з високим рівнем взаємодії і гетерогенності.	Представлення виникаючих явищ, Задається природний опис системи. Гнучкість.	Дуже складно змоделювати психологію людини, коли вона тренується на ірраціональних прикладах. Агентне моделювання використовує математичні відносини, рідко використовуються в реальному світі.	Сучасні підходи
Дискусійні нейронні мережі	Контексти, в яких неможливо визначити деякі відносини між входом і виходом. Контекст, де ми повинні імітувати процес прийняття рішень людиною.	Штучні нейронні мережі працюють краще, лінійні програми, є чорний ящик як мозок людини, навчаються і немає необхідності в перепрограмуванні	Нелінійна якість штучних нейронних мереж ускладнює застосування цього підходу, Для штучних нейронних мереж потрібне тренування Можлива організація зворотного зв'язку	Генетичні алгоритми Нейро-нечітка логіка сучасні підходи
RISP підхід	Контексти, де люди повинні вибрати між двома альтернативами	Простий додаток	Можливість моделювати тільки дві альтернативи	нечітка логіка Нейро-нечітка логіка сучасні підходи
Нечітка логіка	Контексти, в яких людям доводиться вибрати між більш ніж двома альтернативами. Ситуації, які характеризуються невизначеністю.	Нечітка логіка вирішує складні проблеми. Простий додаток. Нечіткі алгоритми надійні	Утомливо розробляти нечіткі правила і функції приналежності. Характеристики нечіткої моделі безпосередньо пов'язані з обчислювальними особливостями. Нечітка логіка заснована на стохастичних припущеннях.	Агентне моделювання динамічні чинники Нейро-нечітка логіка сучасні підходи
Генетичні алгоритми	Контексти, в яких переслідуються більше однієї мети. Контексти, в яких ми повинні навчати штучні нейронні мережі.	Можливе використання генетичних алгоритмів для моделювання мультиоб'єктних проблем. Велике число параметрів може бути проблемою для похідних методів	Чи не гарантує знаходження глобального максимуму. Рішення генетичного алгоритму залежить від фітнес-функції.	Нейро-нечітка логіка сучасні підходи
Засновані на знаннях	Контексти, в яких ми можемо легко кодувати факти і правила. Контексти описуються стандартизованою процедурою. Контекст досить обмежений. Контекст, в якому ми не знаходимо достатню кількість винятків	Може бути легко переведена на комп'ютерні мови. База знань може бути легко змінена і розширена.	Чи не вчиться на помилках, якщо зворотний зв'язок з користувачем і обслуговування людиною не є частиною його постійного розвитку. Навряд чи варто придумувати креативні рішення.	Агентне моделювання Штучні нейронні мережі нечітка логіка Нейро-нечітка логіка. сучасні підходи
Марковські ланцюги	Контексти, де присутні гетерогенні агенти. Контексти, де ми повинні моделювати приховані аспекти, які ми не можемо спостерігати безпосередньо.	Висока надійність (95%) Результати аналізу марківських моделей готові для використанні для графічної презентації.	Неможливо моделювати взаємодії. Засновані на стохастичних законах. Марківські ланцюги мають інтервал прогнозу, обмежений кількома секундами. Марковські ланцюги не включають здібності до навчання	Агентне моделювання динамічні чинники сучасні підходи
Нейро-нечітка логіка	Контексти, в яких недостатньо нечіткої логіки і нейронної мережі для опису ситуації	Високо масштабовані. Виявлення людської поведінки в складній сцені, може бути досягнуто радикальне скорочення даних і програмного / апаратного забезпечення.	Обмеженість підходів нечіткої логіки і штучних нейронних мереж, Сумніви в якості підходу. Сумісність між нечіткою логікою та штучними нейронними мережами	Агентне моделювання генетичні алгоритми сучасні підходи

Висновки

Після огляду найбільш відомих традиційних методів зробимо коротке резюме про сучасні підхо-

ди, де агентне моделювання, мабуть, представляє основні переваги, тому що:

1) це дозволяє моделювати взаємодії між різними об'єктами, які становлять модель;

2) агенти мають здатність вчитися;
 3) всі дії агентів спрямовані на конкретну мету.
 Очевидно, що не можна заперечувати наявність
 недоліків і в агентному моделюванні. Однак обме-
 ження можуть бути зменшені за допомогою нещодав-

давно розроблених методів, але вони все ще знахо-
 дяться на ранній стадії. Тому необхідні подальші
 дослідження для проведення верифікації та валідації
 з метою усунення існуючих недоліків та підвищення
 надійності пропонувані підходів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Agresta M., Bruzzone G. A., de Filice F., Longo F., Massei M., Murino G., Petrillo A., Tremori A., 2015, Human Behavior Simulation for smart decision making in emergency prevention and mitigation within urban and industrial environments, Proc. of the Int. Workshop on Simulation for Energy, Sustainable Development & Environment 2015, 66-74.
2. Ardalan A., Ejeta L. T., Paton D., 2015, Application of Behavioral Theories to Disaster and Emergency Health Preparedness: A Systematic Review, PLoS currents, 7.
3. Mavor A. S., Pew R. W., 1998, Modeling human and organizational behavior: Application to military simulations, National Academies Press, Washington D C.
4. Cordar A., Lampotang S., Lok B., Robb A., Wendling, A., White C., 2015, A comparison of speaking up behavior during conflict with real and virtual humans, Computers in Human Behavior, 52, 12-21.
5. Baines T., Mason S., Siebers P. O., Ladbroke J., 2004, Humans: the missing link in manufacturing simulations, Simulation Modelling Practice and Theory, 12, 515-526.
6. Bocca E., Briano E., Bruzzone G. A., Massei M., 2007, Evaluation of the impact of different human factor models on industrial and business processes, Simulation Modelling Practice and Theory, 15, 199-218.
7. Cacciabue P. C., 1998, Modeling and Simulation of Human Behavior in System Control, Springer, Varese.
8. Liu A., Pentland A., 1999, Modeling and prediction of human behavior, Neural computation, 11(1), 229- 242.
9. Embrey D., Understanding human behaviour and error, Human Reliability Associates 1, 2005; 1-10.
10. Macal C. M., North M. J., 2005, Tutorial on agent- based modeling and simulation, Proceedings of the 37th conference on Winter simulation. Winter Simulation Conference, 2-15.
11. Castle C. J. E., Crooks A. T., 2006, Principles and concepts of agent-based Modeling for developing geospatial simulations, CASA, London.
12. Bonabeau E., 2001, Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems, Proc. National Academy of Sciences, 99(3), 7280- 7287.
13. Deljoo A., Janssen M., Tan Y. H., 2013, The Role of Complex Systems in Public-Private Service Networks, Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012, 279-285.
14. Bazghandi, A., 2012, Techniques, advantages and problems of agent agent modeling for traffic simulation, Int J Comput Sci, 9(1), 115-119.
15. Elkosantini S., 2015, Toward a new generic behavior model for human centered system simulation, Simulation Modelling Practice and Theory, 52, 108-122.
16. Bruzzone A.G., Tremori A., Tarone F., Madeo F. (2011). Intelligent agents driving computer generated forces for simulating human behaviour in urban riots. International Journal of Simulation and Process Modelling. Vol. 6, Is. 4, 2011, pp. 308-316
17. Bruzzone, A.G., Frascio, M., Longo, F., Massei, M., Siri, A., Tremori, A. (2012). MARIA: An agent driven simulation for a web based serious game devoted to renew education processes in health care. Proceedings of the 1st International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2012, pp. 188-194.
18. Bruzzone, A., Massei, M., Longo, F., Poggi, S., Agresta, M., Bartolucci, C., Nicoletti, L. (2014). Human behavior simulation for complex scenarios based on intelligent agents. Simulation Series, 46 (2), pp. 71-80.
19. Longo F., Nicoletti L., Vena S., Padovano A., (2014). Serious games at increased impact on culture and tourism. Proceedings of the 26th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2014, pp. 641-648.
20. Longo, F., Nicoletti, L., Florio, G., Vetrano, M., Bruno, L., Caputi, L. (2015). Inside virtual: A new app for interactive and intelligent cultural heritage fruition. Proc. of the 27th European Modeling and Simulation Symp., EMSS 2015, pp. 471-478.
21. Gary An. In silico experiments of existing and hypothetical cytokine-directed clinical trials using agent-based modeling. Critical care medicine, 32(10):2050-2060, 2004.
22. Nuria Pelechano, Jan M Allbeck, and Norman I Badler. Controlling individual agents in high-density crowd simulation. In Proc. of the 2007 ACM SIG- GRAPH/Eurographics symp/ on Comp. animation, pp. 99-108. Eurographics Association, 2007.
23. Charles M Macal and Michael J North. Tutorial on agent-based modelling and simulation. Journal of simulation, 4(3): 151-162, 2010.
24. Igor Kotenko. Agent-based modeling and simulation of cyber-warfare between malefactors and security agents in internet. In Proceedings of 19th European Simulation Multiconference "Simulation in wider Europe", 2005.
25. Igor Kotenko. Agent-based modelling and simulation of network cyber-attacks and cooperative defence mechanisms. Discrete Event Simulations, pages 223-246, 2010.
26. Dennis Grunewald, Marco Liitzenberger, Joel Chinnow, Rainer Bye, Karsten Bsufka, and Sahin Albayrak. Agent-based network security simulation. In Proceedings of The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems- Volume 3, pages 1325-1326. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2011.
27. Holger R. M., MarkB. J., ShahinM. A., 2008, State of the art of 8artificial neural net-works in geotechnical engineering, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 8, 1-26.
28. Fausett L. V., 1994, Fundamentals neural networks: Architecture, algorithms, and applications, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
29. Schmidhuber J., 2015, Deep learning in neural networks: An overview, Neural Networks, 61, 85- 117.
30. Abdel-Malek K., Arora J., Bataineh M., Marler T., 2016, Neural network for dynamic human motion prediction, Expert Systems with Applications, 48, 26-34.
31. Xu J. H., 2011 Application of Artificial Neural Network (ANN) for Prediction of Maritime Safety, Information and Management Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 34-38.

32. Dey A.K., 2001, Understanding and using context, *Personal Ubiquit. Comput*, 5, 4-7.
33. Calvo-Florese M. D., Cuellar M. P., Lilius J., Rodriguez N. D., 2014, A fuzzy ontology for semantic modelling and recognition of human behaviour, *Knowledge-Based Systems*, 66(0), 46-60.
34. Enam, S., Godil S., Qidwai U., Shamim M., 2011, Fuzzy logic: A "simple" solution for complexities in neurosciences?, *Surgical neurology international*.
35. Reusch B., 2006, Theory and Applications: International Conference 9th Fuzzy Days in Dortmund, 2006 Proceedings, 38, 18-20.
36. Cannon M. E., Sied S., 2004, Fuzzy logic-based map matching algorithm for vehicle navigation system in urban canyons, *ION National Technical Meeting, San Diego, CA*, p. 26-28.
37. Baines T., Mason S., Siebers P. O., Ladbroke J., 2004, Humans: the missing link in manufacturing simulation?, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 12, 515-526.
38. Sugeno M., Yasukawa T., 1993, A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modelling, *IEE Transaction on Fuzzy Logic System*, 1, vol. 1, 7-31.
39. De Pedro T., Garcia R., Gonzalez C., Naranjo J. E., Sotelo M. A., 2007, Using Fuzzy Logic in Automated Vehicle Control, *IEEE Intelligent System*, 22 (1), 36-45.
40. Acampora G., Foggia P., Saggese A., Vento V., 2015, A hierarchical neuro-fuzzy architecture for human behavior analysis, *Information Sciences*, 130, BOMS.
41. Acampora G., Foggia P., Saggese A., Vento V., 2012, Combining Neural Networks and Fuzzy Systems for Human Behavior Understanding, *2012 IEEE Ninth International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance*, 88-93.
42. Deepa S. N., Sivanandam S. N., 2007, Introduction to genetic algorithms, Springer Science & Business Media, New York, 34-35.
43. Tabassum M., Kuruvilla M., 2014, A genetic algorithm analysis towards optimization solutions, *International Journal of Digital Information and Wireless Communications, IJDIWC*, 4(1).
44. Kosorukoff A., 2001, Human based genetic algorithm, *Systems, Man, and Cybernetics*, 2001 IEEE International Conference, IEEE, 5, 3464-3469.
45. Luenberger D. G., 1979, Introduction to Dynamic Systems: Theory, Model and Applications, Stanford, John Wiley & Sons.
46. Liu A., Pentland A., 1999, Modeling and prediction of human behavior, *Neural computation*, 11(1), 229-242.
47. Dongyue H., Jixiang N., Qiang Z., Xiaoqing W., Zhiting L., Analyzing and modeling heterogeneous behavior, *Physica A*, 450, 2016; 287-293
48. Liu A., Pentland A., 1999, Modeling and prediction of human behavior, *Neural computation*, 11(1), 229-242.
49. Vladimir Gorodetski and Igor Kotenko. Attacks against computer network: formal grammar-based framework and simulation tool. In *Proceedings of International Workshop on Recent Advances in Intrusion Detection*, pages 219-238. Springer, 2002.
50. Blake Shepard, Cynthia Matuszek, C Bruce Fraser, William Wechtenhiser, David Crabbe, Zelal Gungordii, John Jantos, Todd Hughes, Larry Lefkowitz, Michael J Witbrock, et al. A knowledge-based approach to network security: applying eye in the domain of network risk assessment. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, volume 20, page 1563. Menlo Park, CA; Cambridge, MA; London; AAAI Press; MIT Press; 1999, 2005.
51. Jordi Conesa, Veda C Storey, and Vijayan Sugumaran. Usability of upper level ontologies: The case of researchcyc. *Data & Knowledge Engineering*, 69(4):343-356, 2010.
52. Botia, J. A., Campuzano F., Garcia-Valverde T., Serrano, E., 2014, Generation of human computational models with knowledge engineering, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 35, 259-276.
53. Oliver N., 2016, Data-driven Human Behavior Models: Opportunities and Challenges, *Proceedings of the 4th Spanish Conference on Information Retrieval*, ACM.
54. Abebe E, Almashor M., Beloglazov A., Richter J., Charles Barton Steer K. C. B, 2016, Simulation of wildfire evacuation with dynamic factors and model composition, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 60, 144-159.
55. Sun, R. (2006). The CLARION cognitive architecture: Extending cognitive modeling to social simulation. In: *Cognition and Multi-Agent Interaction: From Cognitive Modeling to Social Simulation* (SUN, R., ed.). Cambridge University Press, pp. 79-99. <http://www.cogsci.rpi.edu/~rsun/sun.clarion2005.pdf>

Received (Надійшла) 22.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.11.2019

Methods for modeling agent behavior in information and communication systems

O. Milov, M. Kostyak, S. Milevsky, S. Pogasiy

Abstract. The most common tools and approaches to modeling agent behavior in information and communication systems are analyzed. In particular, such tools as agent modeling, artificial neural networks, fuzzy logic, genetic algorithms, knowledge-based approaches, Markov chains, etc. are considered. In addition to classical tools and approaches, new applied methods are also considered, namely, a person-centered system, analysis video, data-driven data storage, dynamic factors. As a result of the analysis, conclusions are drawn about the current state of issues of modeling human behavior. It is determined that there are a significant number of approaches, and all of them have their advantages and disadvantages. Therefore, it is impossible to determine the optimal approach to modeling human behavior, but it is possible to determine the purpose for which the application of a particular approach can be recommended. The paper presents a scheme indicating possible solutions to overcome the limitations of different approaches. An analysis of these data showed that the agent-based approach solves most problems and removes the limitations typical of other methodologies. This is confirmed by the fact that agent modeling is a flexible approach that is widely used in many contexts of modeling human behavior. further research is needed to carry out verification and validation to address existing weaknesses and improve the reliability of the approaches proposed.

Keywords: modeling tools, human behavior, agent-based modeling, artificial neural networks, fuzzy logic, genetic algorithms, knowledge-based approaches, Markov chains.

О. В. Наконечний

Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИЛ ОБОРОНИ ДЕРЖАВИ

Анотація. Досвід історії війн і воєнних конфліктів показує, що у кожній успішно проведеній воєнній компанії, операції, бою, як і у кожній поразці, необхідно, поряд з іншими причинами, шукати позитивні та негативні сторони у роботі органів матеріально-технічного забезпечення, їх організації, можливостях і способах забезпечення. Розвиток системи логістичного забезпечення завжди здійснювався паралельно з розвитком збройних сил і способів ведення війни, операції і бою. Нові види озброєння, бойової техніки, способи ведення бойових дій висували свої вимоги до системи логістичного забезпечення, змушували виробляти більш сучасні форми організації системи логістичного забезпечення. Система логістичного забезпечення сил оборони держави є складною, багаторівневою структурою. В ході проведеного автором статті дослідження розроблено інтегральний показник оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави. Зазначений показник дозволяє провести оцінку ефективності функціонування системи логістичного забезпечення сил оборони держави, при цьому як системи в цілому так і окремих її елементів. Зазначений показник дозволяє оцінити кількісно-якісний склад сил і засобів логістичного забезпечення сил оборони держави; структуру сил і засобів логістичного забезпечення сил оборони держави; тактико-технічні характеристики зразків озброєння та військової техніки, що входять до складу сил і засобів логістичного забезпечення сил оборони держави; можливості з відновлення зразків озброєння та військової техніки тощо. В процесі проведеного дослідження використані як загальнонаукові, так і спеціальні методи дослідження: семантичний – для розвитку сутнісної частини дефініцій категорійного апарату військової логістики; методи економічного аналізу – для оцінювання тенденцій у військовому забезпеченні Збройних Сил України; методи системного аналізу – для оцінювання передумов та інтеграції цілей у процесі формування військової логістичної системи; методи економіко-математичного моделювання – для оптимізації структури та внутрішніх процесів військової логістичної системи. За результатами проведеного аналізу автором було визначені основні недосконалості системи логістичного забезпечення Збройних Сил України та проведено обґрунтування шляхів удосконалення системи логістичного забезпечення Збройних Сил України.

Ключові слова: система логістичного забезпечення, сили оборони держави, ефективність, форми та способи.

Вступ

Враховуючи наявність об'єктивного чинника стримування реформування Збройних Сил України (ЗС України), типового в контексті теорії менеджменту змін (консервативність, опір змінам), необхідно визнати недостатність теоретичних розробок щодо оптимізації шляхів реформування ЗС України, передусім їх логістичного забезпечення.

Якщо для підприємницького середовища концепція логістики все в більшій мірі сприймається як один з найбільш ефективних інструментів підвищення конкурентоспроможності за рахунок переваг у витратах, у якості, в еластичності, надійності, то для військової сфери це не завжди є характерним.

Логістика – це планування та здійснення переміщення та забезпечення військ (сил), яка застосовується до аспектів військових операцій, пов'язаних із наступними видами діяльності: проектування, розробка (модернізація та модифікація), закупівля, зберігання, транспортування, розподіл, технічне обслуговування та ремонт, евакуація та утилізація матеріальних засобів; транспортування особового складу; закупівля (будівництво), технічне обслуговування, експлуатація та реалізація військових об'єктів; закупівля або надання послуг з харчування, лазне-прального обслуговування; медичне забезпечення, тощо [1–5].

Організація системи логістики ЗС України передбачає широке використання продукції виробництва підприємств промисловості держави.

Вже згадана система не є автономною і самодостатньою, вона вбудована в загальні економічні

процеси держави і схильна до впливу не тільки кризових явищ в економіці, але і перетворень, що відбуваються в системі державного управління.

Класифікація систем логістичних систем наведена на рис. 1.



Рис. 1. Класифікація логістичних систем

Система логістичного забезпечення сил оборони держави є складною, багаторівневою структурою. Зазначене вимагає врахування різних за походженням показників оцінки ефективності її функціонування. Враховуючи зазначене, актуальним науковим завданням є врахування максимальної кількості показників, за допомогою яких відбувається оцінювання системи логістичного забезпечення сил оборони держави.

Метою зазначеної статті є розробка інтегрального показника оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави.

Виклад основного матеріалу дослідження

У статті наведено розробку інтегрального показника з оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави, в тому представленні щоб їх потенційна здатність задовольнити потреби складових сил оборони в озброєнні, військовій та спеціальній техніці, матеріально-технічних засобах, послугах та створення сприятливих умов для виконання ними завдань з оборони держави.

Узагальнений показник оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави може бути розрахований шляхом згортки часткових показників, що відображають:

кількісно-якісний склад сил і засобів логістичного забезпечення сил оборони держави;

структура сил і засобів логістичного забезпечення сил оборони держави;

тактико-технічні характеристики зразків озброєння та військової техніки, що входять до складу сил і засобів логістичного забезпечення сил оборони держави;

можливості з відновлення зразків озброєння та військової техніки тощо [6–10].

Дотримуючись принципів системного аналізу в інтересах вибору адекватної системи показників, доцільно представити сукупність складових системи логістичного забезпечення у вигляді ієрархії систем. Такий підхід застосовується в практиці дослідження ієрархічних багаторівневих систем військового призначення [11–13]. Система логістичного забезпечення Збройних Сил – сукупність взаємопов'язаних або взаємодіючих органів управління, сил і засобів логістичного забезпечення Збройних Сил.

Система логістичного забезпечення сил оборони держави включає в себе сукупність об'єднаних спільною метою функціонування її функціональних складових (організаційно-штатних підрозділів) і може бути описана вектором показників, що характеризують внесок останніх у рівень функціонування складових оперативного угруповання військ (сил):

$$E^{\Phi C} = (E^{\Phi C_1}, E^{\Phi C_2}, \dots, E^{\Phi C_n}, \dots, E^{\Phi C_N}), \quad (1)$$

де $E_n^{\Phi C}$ – рівень n -ої організаційно-штатної структури, що входить до системи логістичного забезпечення; N – кількість функціональних складових.

Під функціональними складовими системи логістичного забезпечення сил оборони держави мається на увазі: **органи управління логістичним забезпеченням** - органи військового управління (органи управління) Збройних Сил, інших військових формувань, правоохоронних та розвідувальних органів, Держспецзв'язку, Державної служби з надзвичайних ситуацій, на які до наданих законодавством повноважень покладені завдання з логістичного забезпечення; **сили і засоби логістичного забезпечення** - арсенали, бази, центри забезпечення, склади, автомобільні та ремонтно-відновлювальні військові частини (підрозділи) Збройних Сил, інших складових сил оборони, які призначені для утримання запасів озброєння, військової та спеціальної

техніки, матеріально-технічних засобів, їх підвезення, технічного обслуговування і ремонту. Тоді кожна складова (організаційно-штатна структура) може бути описана вектором показників, що характеризують внесок її елементів у рівні належності функціональної підсистеми: Для реалізації функцій та вирішення завдань логістичного забезпечення військ (сил) створюється система логістичного забезпечення, як сукупність взаємопов'язаних або взаємодіючих елементів, зв'язки між якими ґрунтуються на комплексних підходах до побудови організаційних структур, виходячи з єдиних методологічних поглядів щодо її створення.

Система логістичного забезпечення включає підсистеми: систему планування логістичного забезпечення, систему управління логістичним забезпеченням з виконавчою складовою – силами і засобами логістичного забезпечення:

$$E^{\Phi C} = (E^{\Phi C_1}, E^{\Phi C_2}, \dots, E^{\Phi C_k}, \dots, E^{\Phi C_K}), \quad (2)$$

де $E_k^{\Phi C}$ – рівень належності k -го елемента функціональної підсистеми системи логістичного забезпечення; K – кількість елементів у функціональній підсистемі системи логістичного забезпечення.

Показники ефективності функціонування системи логістичного, як якісні, так і кількісні, в сукупності відображають стан, поділяться на інтегральний, узагальнені та часткові [4].

Інтегральний показник оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави є згортою узагальнених показників її функціональних складових, елементи яких, у свою чергу, характеризуються сумами часткових показників. У формалізованому вигляді інтегральний показник оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави є таким:

$$E^{C/ПЗ} = F[R(t), U(t), Q(t), Y(t)], \quad (3)$$

де $E^{C/ПЗ}$ – складові функціонування системи логістичного забезпечення сил оборони держави на момент часу t (на ℓ -му етапі) періоду T , $t \in T$; $R(t), U(t), Q(t)$ – узагальнені показники складових системи логістичного забезпечення сил оборони держави; $Y(t)$ – умови зміни оперативної обстановки сил оборони держави. Рівень функціонування організаційно-штатних структур системи логістичного забезпечення сил оборони держави в умовах $Y(t)$ визначається виразом [11–13]:

$$R(t) = f_1(r^{\text{баз}}, r^{\text{зоб}}, Y(t)),$$

де $r^{\text{баз}}, r^{\text{зоб}}$ – рівні функціонування організаційно-штатних структур, що виконують базові функції системи логістичного забезпечення сил оборони держави та забезпечуючи функції системи логістичного забезпечення сил оборони держави. У свою чергу:

$$r^{\text{баз}}(t) = f_2\left(\left\{r_1^{\text{зн}}\right\}, \left\{r_1^{\text{як}}\right\}, \left\{r_1^{\text{ук}}\right\}, \left\{r_1^{\text{спос}}\right\}\right),$$

де $\{r_1^{3h}\}$ – часткові показники, що характеризують частку сил та засобів, що виконують базові функції системи логістичного забезпечення сил оборони держави, що будуть знищені; $\{r_1^{як}\}$ – часткові показники, що характеризують якісний стан підрозділів, що виконують базові функції системи логістичного забезпечення сил оборони держави; $\{r_1^{ук}\}$ – часткові показники укомплектованості особовим складом; $\{r_1^{снос}\}$ – часткові показники, що характеризують спосіб застосування підрозділів що виконують базові функції системи логістичного забезпечення сил оборони держави.

Залежно від значення показника $r^{заб}(t)$ його можна описати таким чином:

$$r^{заб}(t) = f_3\left(\{r_m^{эфф}\}, \{r_m^{як}\}, \{r_m^{ук}\}, \{r_m^{снос}\}\right).$$

Рівень функціонування підсистеми управління системи логістичного забезпечення сил оборони держави в умовах $Y(t)$ визначається виразом:

$$U(t) = f_4(u^{oy}(t), u^{ny}(t), u^{zy}(t)Y(t)),$$

де $u^{oy}(t), u^{ny}(t), u^{zy}(t)$ – рівні функціонування елементів управління системою логістичного забезпечення, систем та засобів автоматизації та зв'язку.

У свою чергу $u^{oy}(t) = f_5\left(\{u^{опз}\}, \{u^{инф}\}\right)$,

де $\{u^{опз}\}$ – часткові показники, що характеризує якість організації управління складовими системи логістичного забезпечення сил оборони держави; $\{u^{инф}\}$ – часткові показники, що характеризують рівень інформаційного забезпечення підрозділів.

До часткових показників $\{u^{опз}\}$ відносяться: $u^{сум}$ – рівень відповідності підрозділів системи логістичного забезпечення сил оборони, новим формам та способам їх застосування; $u^{ук}$ – рівень укомплектованості органів управління логістичним забезпеченням відповідними фахівцями; $u^{впов}$ – рівень впровадження сучасних алгоритмів підтримки та прийняття рішень; $u^{адап}$ – рівень адаптації до змін оперативної обстановки; $u^{упр}$ – рівень відповідності організаційної структури системи управління до вимог з управління. Часткові показники $\{u^{инф}\}$ включають: $\{u^{план}\}$ – рівень відповідності інформаційного забезпечення при плануванні використання підрозділів системи логістичного забезпечення до необхідного; $\{u^{инфз}\}$ – рівень відповідності інформаційного забезпечення при безпосередньому управлінні підрозділами системи логістичного за-

безпечення до необхідного; $\{u^{цп}\}$ – тривалість циклу добування, збору та доведення даних про об'єкти забезпечення від всіх джерел по відношенню до необхідної; $\{u^{онов}\}$ – період повного оновлення даних про обстановку.

Рівень функціонування пунктів управління:

$$u^{ny}(t) = f_6\left(\{u^{mex}\}, \{u^{функ}\}\right),$$

де $\{u^{mex}\}$ – часткові показники, що відображають технічне оснащення пунктів управління системи логістичного забезпечення сил оборони держави; $\{u^{функ}\}$ – часткові показники, що характеризують процес функціонування пунктів управління системи логістичного забезпечення сил оборони держави.

$$u^{cy}(t) = f_7\left(u^{интег}, u^{сум}, u^{своєч}, u^{снз}, u^{имд}\right),$$

де $u^{интег}$ – рівень інтеграції автоматизованої системи управління засобами логістичного забезпечення у мережецентрично-орієнтовану технічну основу системи управління логістичного забезпечення; $u^{сум}$ – рівні сумісності існуючих (тих що надходять на озброєння) засобів автоматизації пунктів управління на різних рівнях управління; $u^{своєч}$ – рівень своєчасності приймання, обробки, відображення і передачі директивних документів, команд та сигналів; $u^{снз}$ – рівень спеціального захисту засобів передачі та обробки інформації; $u^{имд}$ – рівень оснащення органів управління інформаційно-моделюючими комплексами. З урахуванням (3) інтегральний показник має вигляд:

$$E = F \left[\begin{array}{l} R(t), U(t), Q(t), Y(t), \\ f_{12}(\{z_j(t)\}, \{n_{ij}(t)\}, \{c_j(t)\}) \end{array} \right], \quad (4)$$

де $\{z_j(t)\}$ – сукупність задач, що покладені на систему логістичного забезпечення сил оборони держави, в j -му варіанті її дій, $z \in Z$; $\{n_{ij}(t)\}$ – система зміни організаційно-штатної структури системи логістичного забезпечення сил оборони держави, направлених на зміну її i -тих ($i \in I$) показників у j -му варіанті дій, $n \in N$; $\{c_j(t)\}$ – ресурси, що виділені на реалізацію j -го варіанту дій системи логістичного забезпечення сил оборони держави, $j \in J$; I, N, Z, J – множина показників, заходів розвитку, варіантів переліку задач, що покладені на систему логістичного забезпечення сил оборони держави, та варіантів її розвитку.

Висновки

1. В зазначеній статті автором проведено розробку інтегрального показника оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави.

2. Сутність зазначеного інтегрального показника полягає в тому, що він дозволяє врахувати основні показники, що впливають на ефективність функціонування системи логістичного забезпечення сил оборони держави, що є різні за походженням, одиницями виміру та змістом.

Також зазначений інтегральний показник дозволяє врахувати показники, що виникають в процесі функціонування системи логістичного забезпечення сил оборони держави.

3. Формування інтегрального показника оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави відбувається на основі узагальнених показників, які в свою чергу є сукупністю часткових показників оцінки ефективності системи логістичного забезпечення сил оборони держави.

Напрямок подальших досліджень слід вважати розробку методики оцінки ефективності функціонування системи логістичного забезпечення сил оборони держави.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Военно-экономический анализ // под ред. С.Ф. Викулова. М.: Воениздат, 2000. С. 31–34.
2. Наставление комитета начальника штабов JP 4-0.
3. Всестороннее обеспечение (ADP 4-0 Sustainment).
4. Полевой устав ВС США FM4-01.30 (FM 55-10).
5. Шкурко Ю.М. Методический аппарат военно-экономического анализа мероприятий строительства вооруженных сил // Военная наука и оборонная политика. 2003. № 2. С. 14–16.
6. Топоров А.В., Бабенков В.И. Обоснование концептуальных подходов к оценке военно-экономической эффективности системы материально-технического обеспечения группировки войск (сил) // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 9–10 (99–100). С. 110–114.
7. Топоров А.В., Бабенков В.И. Методологические основы военно-экономической эффективности интегрированной системы материально-технического обеспечения // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 4 (99). С. 13–22.
8. Топоров А.В., Коновалов В.Б., Бабенков А.В. Обоснование военно-экономической эффективности процесса доставки материальных средств группировке войск (сил) // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 2 (97). С. 48–51.
9. Бабенков В.И., Башкиров Д.С. Перспективные исследования военно-экономической эффективности материально-технического обеспечения войск // Актуальные проблемы развития современной науки и образования: сборник международной научно-практической конференции. 2017. С. 112–113.
10. Бабенков А.В. Методологические подходы к военно-экономическому обоснованию и оценке параметров логистических процессов в системе материально-технического обеспечения войск // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 1 (91). С. 25–31.
11. Гурьянов А.В., Бабенков В.И. Военно-промышленная безопасность цепей поставок компонентов оборонно-промышленного комплекса // Электронный научный журнал. 2017. № 7 (22). С. 72–75.
12. Калинин А.Н., Козин М.Н. Обоснование параметров оценки эффективности логистической системы обеспечения частной военной компании. *Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики*. 2015. № 11–12. С. 29–33.
13. Наконечний О. В. Аналіз умов та факторів, що впливають на ефективність функціонування системи логістики сил оборони держав / О. В. Наконечний // Системи управління навігації та зв'язку. Вип. 3(55). – Полтава : ПНТУ, 2019. – С. 48-57. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.048>

Надійшла (received) 08.10.2019

Прийнята до друку (accepted for publication) 11.12.2019

Integral indicator of estimation of efficiency of the system of logistic support of the state defense forces

O. V. Nakonechnyi

Abstract. The experience of the history of wars and military conflicts shows that in every successfully conducted military company, operation, battle, as well as in every defeat, it is necessary, along with other reasons, to look for the positive and negative sides in the work of the material and technical support bodies, their organization, capabilities and ways of providing. The development of the logistics support system has always been carried out in parallel with the development of the armed forces and methods of warfare, operations and combat. New types of weapons, military equipment, methods of warfare put forward their requirements for the logistics support system, forced to produce more modern forms of organization of the logistics support system and support methods. The system of logistic support of the state defense forces is a complex, multi-level structure. In the course of the research conducted by the author of the article, an integrated indicator was developed to evaluate the effectiveness of the system of logistics support for the state defense forces. This indicator allows us to assess the effectiveness of the functioning of the system of logistics support of the state defense forces, both the system as a whole and its individual elements. The specified indicator allows you to assess the quantitative and qualitative composition of the forces and means of logistics support of the state defense forces; the structure of the forces and means of logistics support of the state defense forces; performance characteristics of weapons and military equipment that are part of the forces and means of logistics support of the state defense forces; opportunities for the restoration of weapons and military equipment, etc. In the process of the study, the author used both general scientific and special research methods: semantic - for the development of the essential part of the definitions of the categorical apparatus of military logistics; methods of economic analysis - to assess trends in the military support of the Armed Forces of Ukraine; system analysis methods - to assess the prerequisites and the integration of goals in the process of forming a military logistics system; methods of economic and mathematical modeling - to optimize the structure and internal processes of the military logistics system. Based on the results of the analysis, the author identified the main imperfections of the logistics system of the Armed Forces of Ukraine and substantiated ways to improve the logistics system of the Armed Forces of Ukraine.

Keywords: logistic support system, state defense forces, efficiency, forms and methods.

E. Skakalina

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

APPLICATION OF ANT OPTIMIZATION ALGORITHMS IN THE SOLUTION OF THE ROUTING PROBLEM

Abstract. The article discusses current issues of using evolutionary algorithms to solve the routing problem. Ant algorithms (MA), like most types of evolutionary algorithms, are based on the use of a population of potential solutions and are designed to solve combinatorial optimization problems, first of all, search for various paths on graphs. The cooperation between individuals (artificial ants) is implemented on the basis of stigmergy modeling. In addition, each agent, called artificial ant, is looking for a solution to the problem. Artificial ants consistently build a solution to the problem, moving around the graph, lay the pheromone and, when choosing a further section of the path, take into account the concentration of this enzyme. The higher the concentration of pheromone in the subsequent section, the greater the likelihood of its choice. Since MA is based on the movement of ants along some paths, MAs are effective, first of all, in solving problems that can be interpreted in the form of a graph. Computer experiments showed that the efficiency of MA increases with increasing dimension of the problem and for tasks on high-dimensional graphs they work faster than other evolutionary algorithms. Good results were also noted in solving non-stationary problems on graphs with a changing environment. In connection with this, the implementation of the meta - heuristic method is proposed as a modification of ant optimization algorithms. The scheme of the system is presented. A software product specification is also provided.

Keywords: evolutionary algorithms, routing problem, ant optimization algorithms.

1. Introduction

In the process of managing complex technical and organizational-technical systems it is necessary to constantly make difficult decisions related to the consideration of many quality criteria and restrictions on resources. If you make such decisions using only the intuition and experience of the manager, it will be difficult to make the best choice. In this regard, it is necessary to develop and implement formalized methods of decision support. Formal mathematical decision-making models nowadays increasingly reflect the complexity of real-world practical problems, which, on the one hand, make them more relevant to real systems, and, on the other, lead to the need to solve increasingly complex optimization problems.

The basic properties of real-world practical optimization problems - the presence of many criteria, significant constraints, multidimensional variables, and algorithmic task functions - make it impossible to apply traditional methods. The way out of this situation is to use adaptive stochastic algorithms, successfully overcome these difficulties. One of the most commonly used approaches in this setting is evolutionary algorithms, which are stochastic optimization procedures that mimic natural evolution processes, in particular, genetic algorithms (GA). The algorithmic function assignment and the multidimensionality of the variables do not present additional difficulties for GAs who work with binarized representations of solutions and do not require information about the properties of the target functions. However, the presence of many criteria and limitations complicate the use of GA in practical tasks, ie. most approaches proposed in the field of evolutionary optimization are focused on only one problem, that is, either multicriteria, or constraints.

Approaches combining both areas are rare and their effectiveness is not always satisfactory. Optimization and planning of cargo flows, finding

rational routes result in significant savings of enterprise resources. With the correct implementation of the task, you can minimize production costs by 5-8% and significantly improve the quality of service recipients, improve the efficiency of production processes of the enterprise. One way to save resources when transporting goods is to use decision support systems (DSS) in the field of transport logistics. Development of software packages that solve basic ones the task of this field requires serious scientific research in order to obtain efficient algorithms suitable for everyday use. One of the key features of the DSS is the in the field of transport logistics there is an opportunity of calculation and construction effective in terms of detours for various routes on the transport network. This problem is most common among companies that carry goods from some warehouse to points of consumption or retail.

The mathematical formulation of this problem is commonly known as the Transport Routing Problem. There are a number of types of TRP with different additional conditions that allow to take into account the load capacity of vehicles and other restrictions for a more complete presentation of the details of real reality. TRP is a generalization of the known task challenge of the traveler (CT) in case of construction right away several closed routes passing through some common summit - the so-called "depot". TRP and CT belong to the class of discrete problems optimization and are NP-heavy. There are no methods of finding their exact solutions and optimality testing for approximations of polynomial time. There is a known exact algorithm for the solution of TRP based on the method branches and boundaries, but due to the extremely fast computation time it cannot be used for tasks with more than 25-30 vertices.

An overview of the latest sources of research and publications

The development of methods and means of artificial intelligence allows to apply them to an

increasingly wide range of problems and problems of optimal control theory in particular. First and foremost, this applies to tasks that are obtained only approximate solution methods or the solution of exact methods is quite large. To the class of such problems is undoubtedly one of parametric optimization of various kinds of automatic systems according to the criteria of different species. A modern trend in the design and development of automatic control systems (ACS), and the DSS is used not only integral, but also other, non-standard criteria [1], as well as an increase in the number of adjustable parameters. All this makes researchers when solving problems of parametric optimization to turn to new methods and tools, including to such relatively new artificial intelligence technique like genetic algorithm. The increase in foreign [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] and domestic [9, 10, 11, 12, 13] publications on the subject testifies to the considerable interest of researchers to this kind of problem. A great contribution to the application of genetic algorithm for solving various optimization problems introduced John Holland [14], K. A. De Jong [15] etc.

However, with all the diversity of publications, a number of questions remain unresolved regarding the application of the genetic algorithm to solve the problem of parametric optimization for automated systems, which makes such studies relevant

2. Basic material and results

2.1. Optimization tasks and their place in road transportation planning

Currently, one of the main ways to improve the quality and efficiency of freight traffic is to choose the options for the use of vehicles, which include a number of tasks, in solving each of which, from obtaining an order for transportation, from the many options should be selected optimal, that is, the best.

Depending on the type of problem being solved, a specific metric is selected for which it seeks to find the best value (for example, the minimum ATS run, the maximum profit, etc.). This indicator is called the optimality criterion and is a function of the independent parameters (output) of the problem:

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

The decrease or increase in the value of the criterion of optimality is determined by the need to fulfill different customer requirements, road conditions, vehicle technical parameters, etc. Indicators and characteristics to which constraints are imposed are also functions of independent parameters and are called constraint functions that can be given in the form of equalities and inequalities

$$R_i = R_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (2)$$

$$R_j = R_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0; \quad x_k \leq 0 \quad (3)$$

When solving optimization problems, it is necessary to define and substantiate the optimality criterion and to clearly identify the indicators and characteristics that are accepted as constraints. The set of formulas that allow for a given set of parameter values to calculate the values of

the constraint functions and the optimality criterion are called a mathematical model.

2.2. Features of transport optimization problems.

The widespread use of optimization methods in road transport is inextricably linked with the development of computer facilities, which allows to find the optimal solution in the online mode, taking into account the changing environment. Thus, the choice of the best option is the next, natural step in the higher organization of planning and management of road transport.

The specific properties of the tasks of planning the transport process, especially the tasks of operational planning, which caused the need to involve a mathematical apparatus of modern computer facilities, the following:

- The overwhelming number of such tasks are multivariate. The variety of types of vehicles (TRPs), the large number of their locations, loading and unloading points leads to a huge number of possible delivery options (for example, when solving the problem of fixing eight consumers for five suppliers, hundreds of millions of options are possible). Typically, dozens of trucking organizations, hundreds of suppliers and thousands of consumers are involved in solving practical problems.

- Tasks are characterized by a limited time to process the source information, since although there is a premature receipt of primary information (ten days, five days, months), daily and even hourly corrected information arrives, which can not lead to distortion of the real situation, receiving unnecessary to practice the results.

- Significant initial task sizes. This property is especially characteristic of large industrial centers, where there are a large number of motor transport organizations (MTO), shipment and shipment points (GDP, WFP).

- The presence of a large number of significant restrictions, which may not lead to unacceptable transportation options. This is first of all a limitation: on the time of operation of the TRP on the line; downtime under loading and unloading; GDP and WFP throughput; time of export and delivery of

- cargo; dependence between TRP type and type of cargo, etc.

- Different periodicity of the decision. The period of solving the problems of optimization of cargo flows depends largely on the level of organization, on the technological properties of the goods being delivered, etc.

- When planning the transport process, the number of unloading points far exceeds the number of loading points. This requires special studies and measures related to the aggregation (consolidation) of Consumption Points (WFP), which, on the one hand, reduces the complexity of calculations for computers, and on the other hand increases the cost of processing information and leads to some deviations from the best results.

2.3. Basic methods of optimal planning of cargo transportation

Depending on the tasks to be solved in the practice of transportation planning, various mathematical methods are used to obtain optimal solutions. Due to the

fact that as a criterion of optimality, as a rule, use economic indicators, often such methods are called economic and mathematical methods.

2.4. Modeling of transport networks and calculation of the shortest distances.

When planning the transport the need arises in the definition of the shortest distances between the transportation company (MTC), points of consumption and points of departure of the goods. The shortest distance between points are the basis for the payment by the customer of transport services, for metering of fuel, determination of turnover, payroll drivers, etc.

Determination of the distance of transportation. Determination of the distance of transportation is carried out in several practical ways.

Direct measurement of the distance on the ground. This method is not useful through long distances that cargoes are transported.

Running routes in the vehicle can be carried out on the basis of the testimony of the regular speedometer or special meter distances, which is an optional wheel with the device for fixing the speed. The distance traveled is determined by the formula

$$L_M = 2\pi R_K n_K, \quad (4)$$

where the radius of the wheel; the number of revolutions.

Measurement on the map (plan) of the city or district for help curvimeter.

All these methods have one serious drawback: there is no guarantee that the selected path is the shortest. This disadvantage is especially true with a densely branched road networks in modern cities, when between distant points in many different ways. To find the optimal solutions using mathematical techniques, the application of which requires as input the transport network, reflecting the transport connections between different points.

Build a model of the transport network. The set of all roads of a city or region is the road network. The transport network is a set of roads in the region, suitable for the movement of specified vehicles. The transport network is always a particular case of the road network, usually built for different types of vehicles: cars, trucks with full weight up to 3.5 tons, etc.

The model network can be represented as a graph. A graph is a figure consisting of points (vertices) and segments connecting them (links). The vertices of the graph are points on the network, most important to determine distances or routes.

The links in the graph are segments of the transport network that characterize the presence of a road connection between adjacent vertices. The links in the graph are characterized by numbers that may have different physical meanings. Most often this is the distance, but can also be used, for example, travel time. The direction-oriented links in the graph are called arcs. Virtually every undirected link in a graph includes two equal but opposite arcs. Depending on whether all or part of the links are directed, the graph is oriented or mixed. A graph, each vertex of which can be connected by some sequence of links to any other vertex, is called a bound

graph. In other words, each vertex of a connected graph must have at least one input and one output arc. The graph modeling the transport network must be connected so that from any vertex there is always a path to any other vertex. Characteristic numbers the links of such a graph, usually expressing the length of the path, time or cost of travel. For modeling of the transport network must have: maps, usually maps on a large scale, as they allow with high accuracy to measure distances between points; data on the location of the main OSF and off; additional information from the municipal and road organizations in the form of a list of streets with the characteristic of the roadway; information on the organization of traffic, i.e., schemes of organization of traffic at intersections, squares and transport interchanges, as well as information about the different limitations of movement associated with the established traffic signs.

With this information, the modeling of transport network starts with the placement of graph vertices. For the vertices of the graph take GDP, WFP and so on. Each vertex is assigned a sequence number or other symbol. After placing the vertices they are connected by arcs or links.

2.5. Algorithms for determining the shortest distances on the graph. The interest in the task of finding the shortest distances is explained by the fact that this task is one of the stages in solving most of the problems related to freight. In the process of solving the problems associated with the optimization of freight traffic, many times determine the shortest distances between the vertices of the graph. Therefore, the speed of the algorithms for determining the shortest distances largely depends on the time of solving the whole problem as a whole.

We formulate the problem of the shortest path. Let be a connected graph having R vertices and N oriented arcs, with each arc being assigned a nonnegative number called its length. You need to find the shortest paths and their lengths from the given vertex to all other vertices of this graph.

The length of the shortest path means the sum of the lengths of the arcs that make up this path. Each vertex of a graph can have only one arc, which belongs to any shortest path.

- Dijkstra algorithm - finds the shortest path from one of several vertices of the graph to all others. The algorithm works only for graphs without negative edges;
- Bellman-Ford algorithm - finds the shortest paths from one vertex to all others in a weighted graph. The weight of the ribs can be negative;
- A * search algorithm - finds the route with the least value from one vertex (initial) to the other (destination, final), using the first best matching graph search algorithm;
- Floyd-Worschell algorithm - finds the shortest paths between all vertices of a weighted oriented graph;
- Johnson algorithm - finds the shortest paths between all pairs of vertices of a weighted oriented graph;
- Nearest neighbor algorithm is one of the simplest heuristic methods of solving a traveling salesman problem

- Nearest insertion algorithm
- Ant algorithm - one of the artificial intelligence methods proposed by M. Dorigo

Among the so-called "Soft computing techniques" developed over the past ten years for hard-to-solve discrete optimization problems are

- Genetic algorithms - based on natural selection and genetics
- Ant algorithms (*Ant Colony Optimization - ACO, Ant Systems - AS*) • Model anthill behavior

The imitation of the ant colony self-organization forms the basis of the ant optimization algorithms. An ant colony can be regarded as a multi-agent system in which each agent (ant) functions autonomously by a very simple rule. In contrast to the almost primitive behavior of the agents, the behavior of the whole system turns out to be reasonably reasonable.

Ant algorithms have been seriously studied by European scientists since the mid-1990s. To date, good results have already been obtained to optimize such complex combinatorial tasks as the task of a salesman, the task of optimizing truck routes, the task of coloring a graph, the quadratic task of destination, the task of optimizing network schedules, the task of scheduling, and many others. Particularly effective ant algorithms for dynamic optimization of processes in distributed non-stationary systems, for example, traffic in telecommunication networks.

2.6. Generalized algorithm.

Any ant algorithm, regardless of modifications, will be presented in the following form

- While (exit conditions are not met)
- Creating ants
- Finding a solution
- Pheromone update
- Extra {optional}

Now consider each step in the cycle in more detail

- Create ants
- The starting point where the ant is placed, depends on the restrictions imposed by the conditions of the problem. Because for each task the way the placement of the ants is crucial. Or they all fit in one spot, or to either with repetitions or without repetitions.

• At this stage, you specify the initial level of pheromone. It is initialized to a small positive number to the initial step transition probabilities to the next vertex was zero.

- Search solutions
- The probability of transition from vertex i to vertex j is determined according to the following formula

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha (d_{ij})^{-\beta}}{\sum_{j \in \text{allowed nodes}} \tau_{ij}(t)^\alpha (d_{ij})^{-\beta}}, \quad (5)$$

where the level of pheromone, d_{ij} – distance heuristic, and constant settings.

When $\alpha = 0$ the choice of the nearest city, most likely meaning that the algorithm becomes greedy.

When $\beta = 0$ the selection is made only on the basis of pheromone, leading to suboptimal solutions.

Therefore, a compromise between these values, which is experimentally.

- Update of pheromone
- The level of pheromone is updated in accordance with the formula

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \sum_{k \in \text{Colony that } Q/L_k \text{ used edge}(i,j)} \rho$$

where ρ is the intensity of evaporation of the pheromone, the price of the current solution for the k -th anth and Q is the parameter having the value of the order of the optimal solution, that is, the pheromone deposited by the k th anth using the edge (i, j) .

- Additional actions
- The local search algorithm is usually used here, but it may also appear after searching for all the solutions.

The scheme of work of system of construction of a route and the schedule of process of gathering of raw materials on the example of Okhtyrsky combine (geographical restriction of the project - Shishatsky area, Poltava region).

Incoming data. The number of vehicles involved in the implementation of raw material collection, the characteristics of vehicles (load capacity), the number of points with raw materials, the distance between fleets and points (in kilometers), geographical coordinates of points (longitude and latitude).

Output data. Optimal transport schedule table, road map with points, list of distances and times between points A_i and V_j , shortest route of all the points mentioned in the transport plan table.

Description of the program. Let the company have 3 vehicles allocated for the collection of raw materials and given a certain territory, including, for example, 10 settlements.

All vehicles have the same characteristics, in our case - the load capacity.

Therefore, to get started with the program, you need to initialize the transport table (Fig. 1)

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	Запасы
A1	1	2	3	5	6	7	8	9	10	5	15
A2	23	3	4	7	8	9	10	5	6	7	15
A3	3	3	4	5	6	7	1	2	3	4	15
Потребнос	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	

N: M:

N - кол-во машин;
M - кол-во пунктов сбора;

Fig. 1. Transport table initialized

To do this, select the number of vehicles and the number of items with raw materials from the drop-down lists, and then click on the Create button (Fig. 2). We get an empty transport table (Fig. 3). To fill it with data, first click on the cell marked B1..10 or A1..10 (Fig. 4).

Fig. 2. Creating an input template

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	Запасы
A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
A2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
A3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Потребнос	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

N: 3 M: 10 Создать Установить данные Начать

N - кол-во машин;
M - кол-во пунктов сбора;

Fig. 3. Input transport table

	B1	B2	B3	B4	B5
A1	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-
A3	-	-	-	-	-
Потребнос	0	0	0	0	0

Установить данные Начать

Fig. 4. Filling the transport table with input data

Clicking on the selected cell will bring up a dialog where you want to select a settlement from the list and then click on the Confirm button (Fig. 5). After these manipulations, cell B1 will be assigned to Yareski settlement. When the cells are assigned parameters, you need to click on the "Set Data" button. The program keeps track of the distance between Ai and Bj in the database and automatically inserts them into the corresponding cell Cij (Fig. 6). Manual editing is also supported.

Fig. 5. Consumer choice

	B1	B2	B3	B4	B5
A1	1	2	3	5	6
A2	23	3	4	7	8
A3	3	3	4	5	6
Потребнос	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

N: 3 M: 10 Создать Установить данные Начать

N - кол-во машин;
M - кол-во пунктов сбора;

Fig. 6. Installation of data

As a result, we receive a filled transport table (Fig. 7). It is necessary to click on the "Start" button to start the calculation. After calculations, the program will issue a table of the optimal transportation plan (Fig. 8).

Therefore, raw materials were assigned to all vehicles. Let's choose the first of them (Fig. 9).

Routing. The planning results provided optimal freight, one of which will be considered. Transportation with code A1 must visit points B1, B4, B5, B6. For him, we will initialize the transport table again (Fig. 10), and then click on the button "Build graph".

After that, you will be taken to the page of route construction (Fig. 11).

Поставщик	Потребитель
A1	B1
A1	B4
A1	B5
A1	B6
A2	B2
A2	B3
A2	B6
A2	B10
A3	B7
A3	B8
A3	B9
A3	B10

F (т./км) Fmin (т./км) Минимизация расходов
186 177 4.84%(9)

Fig. 7. Table of optimal transportation plan

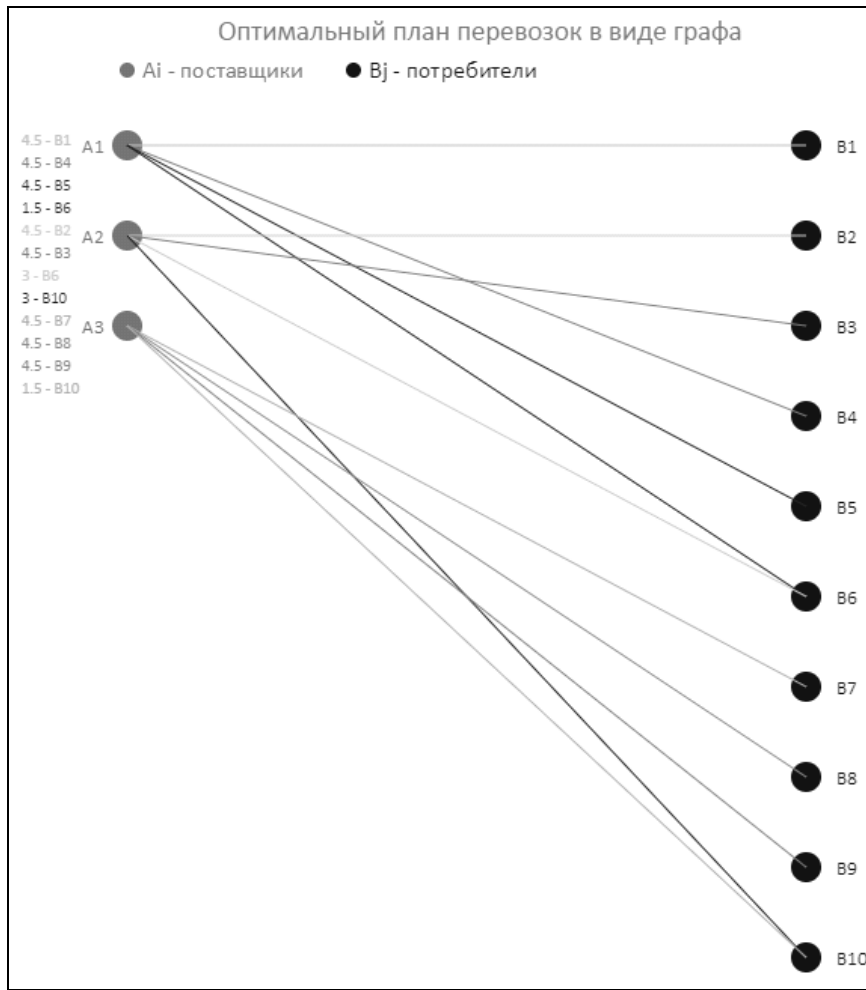


Fig. 8. Optimal plan of transportation in the form of a graph

A1	4.5	B1
A1	4.5	B4
A1	4.5	B5
A1	1.5	B6

Fig. 9. Compliance of vehicles and points with raw materials

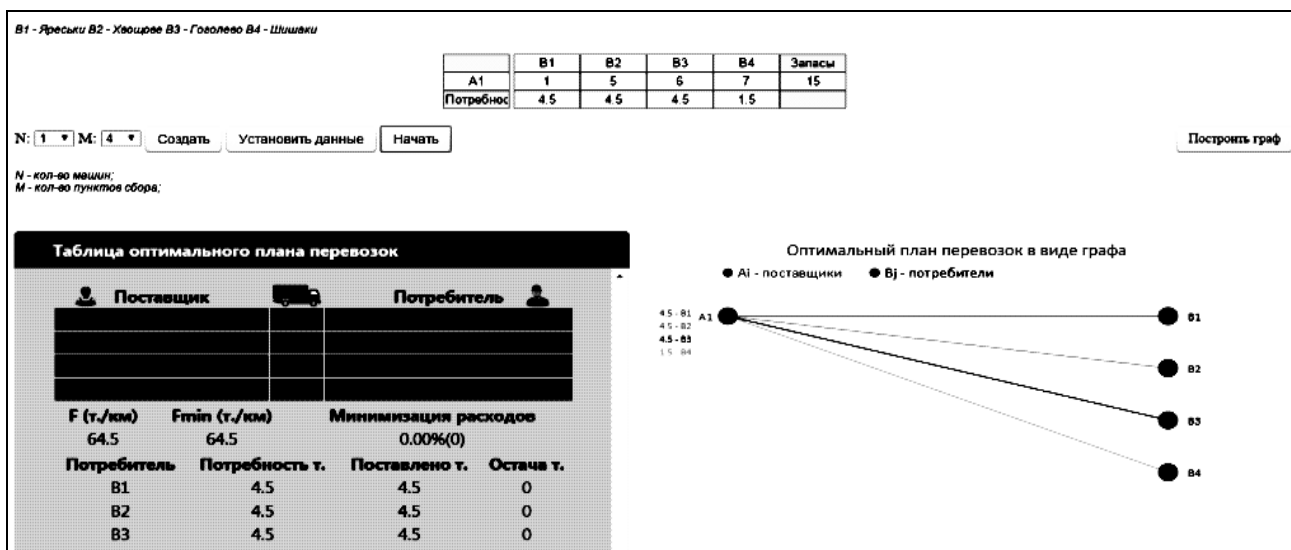


Fig. 10. Transport table

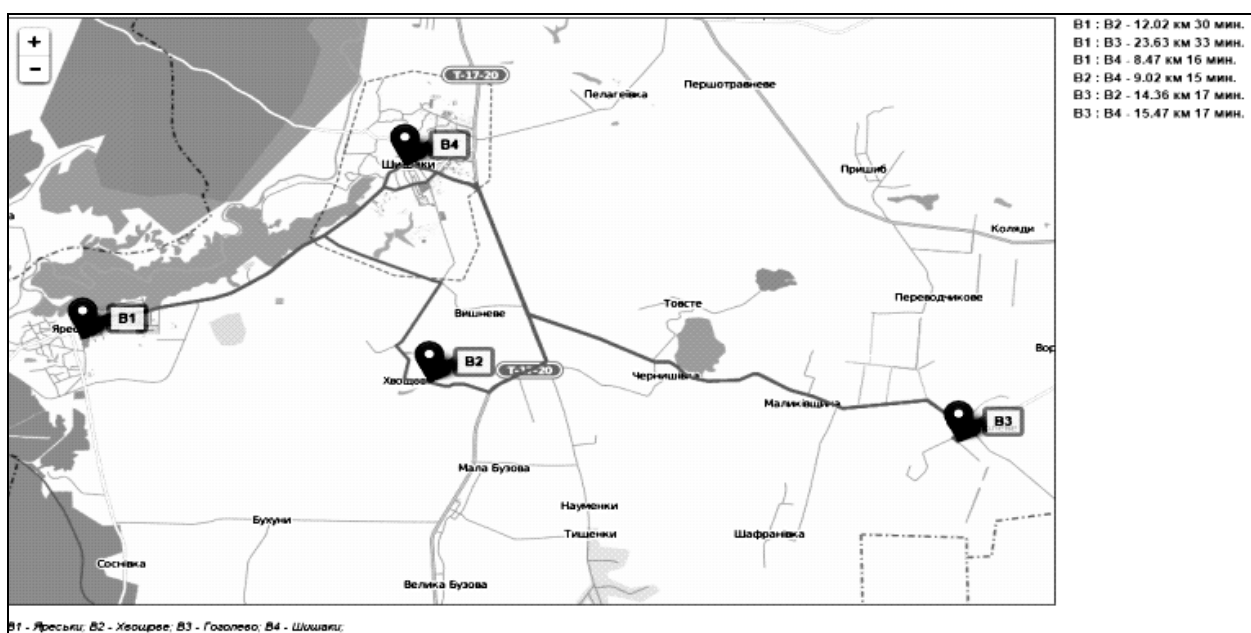


Fig. 11. Construction of the route

The resulting map shows the road network between the points with raw materials. This information shows which roads you should use, their length and time. It is on this grid that a distance matrix search algorithm will look for the shortest route to traverse all points.

2.7. Description of the designed database.

MySQL DBMS was selected for database development (Fig. 12).

The *Consumers* table is responsible for the information on raw material items and contains the following information: item name, latitude and longitude for determining the location on the map, the amount of raw material that can be offered (Fig. 13, 14).

The "suppliers" table is responsible for the information on the vehicles for raw material collection and contains the following information: name, capacity (Fig. 15).

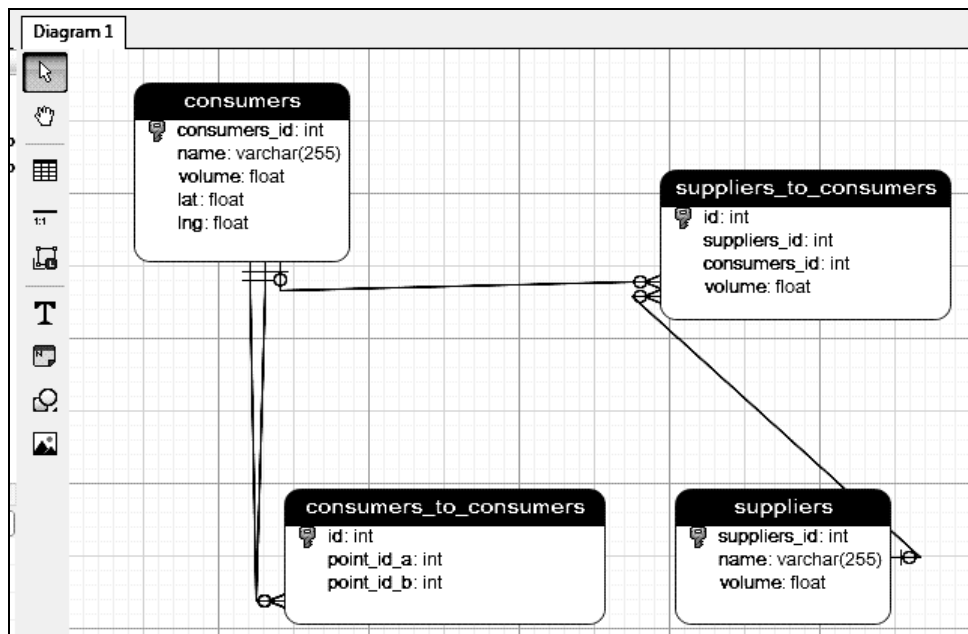


Fig. 12. Database diagram in Navicat

#	Имя	Тип данных	Длина/Знач...	Беззна...	Разреш...	Zerofill	По умолчанию
1	consumers_id	INT	10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	AUTO INCREM
2	name	VARCHAR	255	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
3	volume	FLOAT		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
4	lat	FLOAT	10,6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
5	lng	FLOAT	10,6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL

Fig. 13. Structure of the consumers table

▲ consumers_id	▼ name	volume	lat	▼ lng
3	Гоголево	5	49.814365	34.169399
13	Шафранівка	5	49.792542	34.121567
14	Самарі	5	49.906456	34.111916
10	Чернишівка	5	49.835079	34.083069
11	Тищенки	5	49.781654	34.070210
7	Науменки	5	49.799896	34.060215
9	Мала Бузова	5	49.809433	34.038834
8	Велика Бузова	5	49.782879	34.017681
2	Хвощове	5	49.827271	34.013424
12	Шишаки	5	49.874840	34.006046
16	Бухуни	5	49.797157	33.966698
1	Яреськи	5	49.836975	33.910965

Fig. 14. Consumer table data

#	Имя	Тип данных	Длина/Знач...	Беззна...	Разреш...	Zerofill	По умолчанию
1	suppliers_id	INT	10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	AUTO_INCREMENT
2	name	VARCHAR	255	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	NULL
3	volume	FLOAT		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL

Fig. 15. Suppliers table data

The "suppliers_to_consumers" table is a matrix of distances between a vehicle depot and raw material items (Fig. 16).

The "consumers_to_consumers" table stores information about the communication between the items (Fig. 17, Fig. 18).

#	Имя	Тип данных	Длина/Знач...	Беззна...	Разреш...	Zerofill	По умолчанию
1	id	INT	10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	AUTO_INCREMENT
2	suppliers_id	INT	10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
3	consumers_id	INT	10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
4	volume	FLOAT		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0

Fig. 16. Data from the "suppliers_to_consumers" table

#	Имя	Тип данных	Длина/Знач...	Беззна...	Разреш...	Zerofill	По умолчанию
1	id	INT	10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	AUTO_INCREMENT
2	point_id_a	INT	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
3	point_id_b	INT	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0

Fig. 17. The structure of the table "consumers_to_consumers"

id	point_id_a	point_id_b
280	1	2
284	3	2
279	1	3
281	1	12
289	2	12
285	3	12
282	1	14
290	2	14
286	3	14
291	12	14

Fig. 18. Data from the table "consumers_to_consumers"

Algorithms, technologies and tools used. The following methods and algorithms are involved in the program: minimum element method, potential method, ant colony algorithm. JavaScript and PHP programming languages were used in the software implementation.

Ajax technology is enabled. Used JQuery library, Open Street Map to work with maps. Open Street Map, abbreviated OSM, is a non-profit, web-based mapping project to create a comprehensive free and free map of the world by a community of online users.

Conclusions

Commodity exchange and related transport flows play an important role in the economies of developed countries. The organization of transport flows requires the involvement of not only carriers but also service firms. The organization of flows of export, import and transit cargo was seen as a minor operation. In the USA, more than 90% of the volume of such cargo is organized by the freight forwarders, in Europe 70% of the intermodal transportations are for freight forwarding companies in Europe. In the national freight forwarding sector, there are a total of about 1000 enterprises providing freight forwarding and brokering services,

most of which are unprofessional and do not have a well-developed integrated technology.

Studies show that 85-95% of the total duration of the logistics chain of the production cycle of the commodity movement is the expectation of processing, transportation and other operations, including storage. The goal of logistics is to build a door-to-door delivery

process with minimal losses at the joints, with minimal cumulative costs and time to promote the integrated logistics flow.

The result of the research was the development of a system of optimization of transportation, which meets the modern requirements for software. The software is adapting to the Android platform.

REFERENCES

1. Kim, D.P. Automatic control theory. In 2 vols. Linear systems / D.P. Kim. - M.: FIZMATLIT, 2003. - 288 p.
2. Malhotra, R. Genetic Algorithms: Concepts, Design for Process Controller Optimization / R. Malhotra, N. Singh, Y. Singh // Computer and Information Science. - 2011. - Vol.4. - №2. - p. 39-54.
3. Hall, M. A Cumulative Multi-Niching Genetic Algorithm for Multimodal Function Optimization / M. Hall // International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence. - 2012. - Vol. 1. - № 9. - p. 6-13.
4. Jaen-Cuellar, A.Y. PID Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems / A.Y. Jaen-Cuellar, R.de J. Romero-Troncoso, L. Morales-Velazquez, R. A. Osornio-Rios // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10.
5. Jones, D.F. Multiobjective meta-heuristics: an overview of the current state-of-the-art / D.F. Jones, S.K. Mirrazavi, M. Tamiz // European Res, 2002. - 137 (1): 1-9.
6. Slavov, T. Application of Genetic Algorithm to Tuning a PID Controller for Glucose Concentration Control / T. Slavov, O. Roeva // Electronic journal: Wsea Transaction on Systems. - 2012. - Vol. 11. - № 7. - p. 223-233. - URL: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2012/55-286.pdf>
7. Konak, A. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial / A. Konak, D.W. Soit, A.E. Smith // Reliability Engineering and System Safety 91 (2006). - P. 992-1007.
8. Horohorin, M.A. Genetic algorithm for constructing a fuzzy Pareto set / MA Horohorin, A.A. Dolgov, Yu.V. Udodov, Yu.A. Gubskov // Devices and systems. Management, control, diagnostics. - M.: Nauchteclitizdat, 2012. - №7. - P. 27-31.
9. Podlazova, A. B., Genetic algorithms on examples of solution of cutting problems / A. B. Podlazova // Management problems, 2008. - № 2. - P. 57-63.
10. Denisova, L.A. Automation of synthesis of fuzzy control system using multicriteria optimization and genetic algorithms. Denisova // Automation in Industry, 2014. - №3. - P. 54-62.
11. Dunaev, M.P. Parametric optimization of a pumping station control system using a genetic algorithm. Dunaev, N.N. Kutsiy, N.D. Lukyanov // Science and Education: an electronic scientific and technical publication (electronic journal). - 2014. - # 8 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/721172.html> (accessed: 08/25/2014).
12. Skakalina, E. Evolutionary algorithms in solving logistical. // "Modelare matematica, optimizare si tehnologii informatiionale", Materiale Conferintei Internationale, 19-24 martie 2018, vol.1, Chisinau, 2018, P.310-315.
13. Skakalina, E. (2018), «Development of Methodological Foundations of Logistical Intellectual Control of Complex Systems Based on Hybrid Heuristic Algorithms» // International Journal of Engineering & Technology.- 2018.- Vol. 7, No (4.8). - P.534-538. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.8.27301
14. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence./ John H. Holland. - Cambridge: MIT Press, 1992. - 228p.
15. De Jong, K.A. Evolutionary computation a unified approach / K.A. De Jong. - Cambridge: A Bradford book, 2006. - 256 p.

Надійшла (received) 15.10.2019

Прийнята до друку (accepted for publication) 11.12.2019

Застосування мурашиних алгоритмів в рішенні задачі маршрутизації

О. В. Скакаліна

Анотація. Дослідження показують, що 85-95% загальної тривалості логістичного ланцюга виробничого циклу товарного руху становить очікування на обробку, транспортування та інші операції, включаючи зберігання. Мета логістики - побудувати процес доставки «від дверей до дверей» з мінімальними втратами на місцях з'єднання, з мінімальними накопичувальними витратами та часом для сприяння інтегрованому логістичному потоку. У статті розглядаються актуальні питання використання еволюційних алгоритмів для вирішення задачі маршрутизації. Мурашині алгоритми, як і більшість видів еволюційних алгоритмів, засновані на використанні популяції потенційних рішень і розроблені для вирішення завдань комбінаторної оптимізації, перш за все, пошуку різних шляхів на графах. Кооперація між особинами (штучними мурашками) тут реалізується на основі моделювання стігметрії. При цьому кожен агент, званий штучним мурахою, шукає рішення поставленого завдання. Штучні мурашки послідовно будують рішення завдання, пересуваючись по графу, відкладають феромон і при виборі подальшого ділянки шляху враховують концентрацію цього ферменту. Чим більше концентрація феромону в подальшому ділянці, тим більша ймовірність його вибору. Оскільки в основі мурашиного алгоритма лежить пересування мурах за деякими шляхах, то мурашині алгоритми ефективні, перш за все, при вирішенні завдань, які допускають інтерпретацію у вигляді графа. Проведені комп'ютерні експерименти показали, що ефективність мурашиного алгоритма зростає при збільшенні розмірності задачі і для задач на графах високої розмірності вони працюють швидше, ніж інші еволюційні алгоритми. Відзначено також хороші результати при вирішенні нестационарних задач на графах зі змінною середовищем. В святі з цим пропонується реалізація мета - евристичного методу, як модифікації мурашиних алгоритмів оптимізації. Представлена схема роботи системи. Також представлена специфікація програмного продукту. Результатом дослідження стала розробка системи оптимізації перевезень, яка відповідає сучасним вимогам до програмного забезпечення. Програмне забезпечення адаптується до платформи Android.

Ключові слова: еволюційні алгоритми, задача маршрутизації, мурашині алгоритми оптимізації.

В. В. Собчук

Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ЄДИНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ НА ВИРОБНИЧОМУ ПІДПРИЄМСТВІ З ФУНКЦІОНАЛЬНО СТІЙКИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

Анотація. В роботі проводиться аналіз існуючих методик щодо управління промисловим підприємством. Найбільш відомими з них є такі нормативні документи управління: MRP II (Manufacturing Resource Planning), ERP (Enterprise Resource Planning), APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) і MES (Manufacturing Execution Systems). Наводяться основні переваги та недоліки вказаних систем управління. Проведений аналіз вказує на необхідність створення систем управління нового покоління, яка тісно пов'язане з розвитком методики створення єдиного інформаційного простору підприємства і інтегрованих моделей для автоматизованих систем управління підприємством. Запропонована методика, що ґрунтується на системному підході, який містить формалізований опис всієї сукупності виробничих та бізнес процесів; матеріальних об'єктів та ресурсів, що задіяні в оперативному управлінні виробництвом і його конструкторській та технологічній підготовці. Зазначена методика створення єдиного інформаційного простору підтримується відповідними базовими інформаційними технологіями, що забезпечують: реінжиніринг бізнес-процесів оперативного управління та технічної підготовки виробництва з метою забезпечення переходу від функціонально-орієнтованої до процесної організації управління підприємством; опис і візуальне представлення електронної структури виробу й надання йому статусу стандарту підприємства; управління бізнес-процесами оперативного планування і технічної підготовки виробництва з використанням електронної структури виробу, спрямоване на підтримку функціональних задач APS, MES, PLM-систем. Зокрема, в роботі розглянута математична модель технологічного процесу на промисловому підприємстві. Вводиться поняття та умови функціональної стійкості технологічного процесу на промисловому підприємстві. Вказуються критерії функціональної стійкості технологічного процесу.

Ключові слова: управління виробничим підприємством, стандарти управління, оперативно-виробниче планування, мережеві моделі, методи теорії функціональної стійкості.

Вступ

В даний час підвищення ефективності управління виробничим підприємством тісно пов'язане з вдосконаленням системи оперативно-виробничого планування (ОВП) на підприємстві. При цьому головна мета ОВП полягає в забезпеченні злагодженого, комплексного, ритмічного ходу виробництва по виготовленню та випуску продукції при найповнішому і рівномірному використанні всіх виробничих ресурсів, вчасному виконанні зобов'язань щодо випуску готової продукції на основі рівномірного і комплектного ходу виробництва на кожній виробничій ланці, а також досягненні мінімальної тривалості виробничого циклу (ТВЦ) і, відповідно, скорочення обсягів незавершеного виробництва. Досягнення вищевказаної мети забезпечується за рахунок розв'язання досить складного набору функцій ОВП, до яких, як правило, відносять: розрахунки завантаження виробничих потужностей по підприємству в цілому і виробничих підрозділах зокрема; розрахунки календарно-планових нормативів організації виробничого процесу, в тому числі ТВЦ виготовлення готових виробів та їх елементів, визначення величини незавершеного виробництва, розрахунки партій запуску виробів, визначення термінів випереджуючого запуску виробів у виробництво за фазами і стадіями обробки деталей із виготовленням виробів; розробка календарних графіків запуску-випуску виробів; усталення оперативних виробничих завдань виробничим підрозділам підприємства (цехам, дільницям, робочим місцям); оперативне регулювання, облік і контроль виконання планових

завдань; задачі мережевого планування; задачі побудови розкладів; забезпечення функціональної стійкості систем тощо.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Методам та моделям побудови складних технічних систем присвячено велику кількість наукових робіт О.А. Машкова [1], О.В. Барабаша [2, 3], Г.А. Кучука [4, 5] та і ін. Проблема відмовостійкості складних технічних систем досліджувалась в роботах В.А. Машкова [6], В.А. Савченка [7] та інших вчених. Питання стійкості систем відносно зовнішніх дестабілізуючих впливів досліджувалось О.Г. Додоновим [8], І.В. Рубаном [9] та і ін.

Проблеми побудови та розгортання інформаційних систем, а також кодування даних вирішувались науковцями, серед яких: С.Г. Бунін, В.О. Романов, В.А. Романюк, А.О. Зінченко, І. Akyildiz, С. Fragouli, R. Ahlswede та ін.

В результаті накопиченого досвіду в даній сфері на сьогоднішній день розроблено велика кількість методик ОВП та управління промисловим підприємством. Найбільш відомими з них є такі нормативні документи управління: MRP II (Manufacturing Resource Planning), ERP (Enterprise Resource Planning), APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) і MES (Manufacturing Execution Systems) [10]. Ці системні рішення апробовані за останні 15-20 років на різних виробничих підприємствах в багатьох індустріях.

Спільною рисою вищевказаних систем є те, що в них реалізуються принципи, характерні для інтегрованих автоматизованих систем управління підприємством (ІАСУ), коли автоматизується широкий

комплекс функцій управління, що охоплюють задачі стратегічного, виробничого, фінансового планування, оперативного управління постачанням, закупками, запасами в поєднанні з автоматизацією конструкторської, технологічної підготовки виробництва тощо.

Сьогодні найбільшу увагу при вивченні питань автоматизації управління підприємствами приділяється ERP-системам. Їх концепція побудована на автоматизації та інформатизації бізнес-процесів (БП) планування продажів, об'ємного виробничого та фінансового планування, управління ланцюжками постачання, задач обліку та ін. До переваг ERP-систем слід віднести реалізацію в них процесного підходу до управління промисловим підприємством, що є основою міжнародних стандартів ISO й, по суті, яке визначило представлення ERP-систем як загальноприйнятої міжнародної практики створення систем управління промисловими підприємствами.

Однак ERP-системи мають і суттєві недоліки. Зокрема, в більшості систем ERP планування базується на застосуванні стандарту MRP II. В цьому стандарті передбачається лише об'ємне планування, як правило, на рівні місячного плану. Це обумовлює той факт, що планування робіт, технологічних операцій для верстатів та іншого технологічного обладнання в ERP-системах ведеться без врахування поточного завантаження виробничих ланок і стану незавершеного виробництва. У досить примітивній формі здійснюється визначення тривалості виробничого процесу (ВП) засобами простого підсумовування тривалості всіх його операцій, хоча в дійсності тривалість ВП залежить від завантаженості обладнання на момент виконання замовлення. Це є причиною того, що будь-який детальний ERP-план буде виконати практично неможливо. Коригувати такі плани оперативно, зазвичай, не вдається.

В цих умовах одним із дієвих варіантів є створення на підприємстві системи виробничого планування класу APS (*Advanced Planning & Scheduling Systems*) або, при досить високому рівні автоматизації виробництва, MES-системи (*Manufacturing Execution Systems*), які забезпечують більш точне планування ходу виробництва. Дані системи з'явилися на ринку в кінці 1990-х років і мають головною метою складання детального в порівнянні з ERP-системами цехових і міжцехових розкладу роботи для всього парку обладнання на всіх портфелях замовлень на тривалий термін з врахуванням реального стану незавершеного виробництва.

Системи APS складають розклад роботи всього підприємства, всіх його виробничих ділянок і робочих центрів (РЦ). Але завдання видаються не на окремі робочі місця (це завдання MES-систем), а за окремими цехами. Кожен цех в результаті отримує свій власний розклад на тривалий період роботи. При цьому в порівнянні з алгоритмами MRP II, алгоритми APS при складанні розкладів одночасно враховують як потреби в матеріалах, так і потужності підприємства з врахуванням їх поточного і запланованого завантаження. В алгоритмах APS враховуються переналадження і деякі інші параметри

технологічного середовища [10]. Також APS-системи дозволяють розв'язувати задачі планування з врахуванням комплектації. При цьому під завданнями комплектації ПП в задачах планування будемо розуміти процедуру, яка відповідає за те, що для виготовлення тієї чи іншої одиниці планування (ОП) з портфеля замовлень є в наявності всі необхідні матеріали, всі технологічні та допоміжні ресурси, всі комплектуючі, вся оснастка, весь інструмент, всі норми і вся документація. Якщо все це є в наявності, то виготовлення даної ОП можна планувати в часі.

Розглянемо зазначену процедуру планування детальніше. Припустимо, що є ОП e_i (рис. 1), представлена технологічним процесом у вигляді множини операцій $\{e_{ij}, j=1, \dots, p_i\}$ для кожної операції відомі необхідні для виконання: ресурси, обладнання, інструмент, оснастка, комплектуючі, документація тощо [10].



Рис. 1. Процеси комплектації одиниці планування (ОП)

В процесі комплектації при перевірці будь-якої j -ої операції e_{ij} -ої ОП може виявитися, що для неї потрібен спеціальний інструмент, який не може бути придбаний в силу унікальності, а, отже, повинен бути виготовлений раніше, ніж почнеться по плану j -а операція. На $j+1$ -й операції може виявитися, що для неї потрібне спеціальне пристосування і цього пристосування не тільки немає в наявності, але воно навіть не спроектовано. І, врешті, на якій-небудь k -й операції аналіз покаже, що, по-перше, необхідно придбання стандартних комплектуючих, яких немає на складі підприємства, і немає спеціального вимірювального інструменту, який ще необхідно розробити і виготовити, і т. і. Інакше, ми бачимо, що навіть один технологічний процес виготовлення ОП може породити безліч суміжних бізнес-процесів, виконання яких необхідно забезпечити до моменту початку відповідної основної технологічної операції.

В основі побудови алгоритму розкладів в APS лежить простий інструментарій. Є безліч операцій для всієї сукупності виробів, множини верстатів, і на кожен виріб є обмеження – за термінами випуску, за наявністю матеріалів і т. д. Обмеження поділяються на суттєві та несуттєві. Спочатку, при першому проході алгоритму, складається виробничий

розклад з врахуванням здійсненності суттєвих обмежень, наприклад, відсутність порушень термінів поставок. Якщо розклад сформовано, то він вважається допустимим і приймається як базовий для подальшої «оптимізації» – на наступних проходах алгоритму реалізується спроба врахувати інші, менш важливі, обмеження.

За своєю суттю це не що інше, як ітераційний процес отримання прийнятеного розкладу з врахуванням нових обмежень, які вносяться на новій ітерації. В ряді випадків процес планування спрощують ще більше. Спочатку планують одну деталь, потім іншу, до тих пір, поки всю множину деталей не буде сплановано. Таким чином, спростивши алгоритм побудови виробничого розкладу, APS-системи забезпечують можливість в межах наявних обчислювальних потужностей отримувати допустимі виробничі розклади і більш точно прогнозувати терміни поставок. При цьому APS-системи не ставлять собі складних задач на зразок мінімізації в складених розкладах термінів переналадок, транспортних операцій, зменшення кількості задіяного обладнання і т. і., оскільки облік цих вимог неминуче призведе до ускладнення алгоритмів й неможливості за найкоротший час отримувати розклади для великих розмірностей. В зв'язку з цим APS-системи мають обмежений склад критеріїв планування.

Далі відзначимо, що APS-системи при можливості повинні тісно взаємодіяти з MES-системами, які визначаються як системи оперативного характеру, націлені на формування розкладів роботи не тільки для верстатів, а й для транспортних засобів, систем управління процесами складування, бригад наладчиків і т. п. При цьому основними функціями MES-систем є не тільки планування, але й диспетчеризація виробничих процесів в цеху [10].

Зазвичай MES-системи включають в себе розвинені засоби підтримки технологічної підготовки того чи іншого типу виробництва. Інакше вони можуть мати засоби інтеграції з системами автоматизації проектування технологічних процесів САПР ТП / АСТПВ. Такі ІАСУ іменуються системами класу PLM (product lifecycle management) і характеризуються тим, що в них зникає функціональний і інформаційний розрив між контурами оперативного управління та технічної підготовки виробництва.

Метою роботи є створення систем управління нового покоління, яка тісно пов'язане з розвитком методик створення єдиного інформаційного простору підприємства і інтегрованих моделей для ІАСУ. Методика повинна ґрунтуватися на системному підході, який містять формалізовані описи всієї сукупності виробничих та бізнес процесів; матеріальних об'єктів та ресурсів, що задіяні в оперативному управлінні виробництвом і його конструкторській та технологічній підготовці. Очевидно, що зазначена методика створення єдиного інформаційного простору повинна підтримуватись відповідними базовими інформаційними технологіями, що забезпечують:

- реінжиніринг бізнес-процесів оперативного управління та технічної підготовки виробництва з метою забезпечення переходу від функціонально-

орієнтованої до процесної організації управління підприємством;

- опис і візуальне представлення електронної структури виробу (ЕСВ) й надання йому статусу стандарту підприємства;

- управління бізнес-процесами оперативного планування і технічної підготовки виробництва з використанням ЕСВ, спрямоване на підтримку функціональних задач APS, MES, PLM-систем ІАСУ.

При цьому слід зауважити, що пріоритетною складовою в наведеному переліку компонент ІАСУ, з нашої точки зору, є система середньострокового і оперативного планування. Подібний акцент значимості даної системи обумовлюється тим, що ефективне виробниче планування є найбільш дешевим способом підвищення пропускної спроможності виробничих систем. Причому важливим моментом тут є вибір відповідного методу виробничого планування.

Виклад основного матеріалу

Аналіз відомих методів розв'язування задач виробничого планування показує, що останні при всьому своєму розмаїтті можна розділити на два класи:

- методи мережевого планування;
- методи, що відносяться до загальної теорії розкладів.

При цьому до переваг методів мережевого планування відноситься їх відносна простота, орієнтація на процесне представлення загальної схеми організації робіт з виконання виробничої програми замовлень, природне сприйняття управляючим персоналом мережевих графіків і прив'язки робіт (технологічних операцій), які в них входять до часу і т. і. До недоліків цих методів відносять те, що планування виконання виробничих операцій в них здійснюється з використанням спрощених схем розподілу виробничих потужностей технологічних ланок, без врахування стану незавершеного виробництва і т. і.

До переваг загальної теорії розкладів, що використовує методи імітаційного моделювання, при формуванні виробничих програм відносять можливість врахування великої кількості технологічних і організаційних обмежень, поточного завантаження виробничих ланок та стану незавершеного виробництва. При цьому загальна теорія розкладів дозволяє розв'язувати лише задачі планування з невеликою розмірністю, водночас, вузька орієнтація методу спрямована на підвищення завантаження виробничого обладнання без чіткого управління термінами виконання виробничої програми за відсутності процесного представлення загальної схеми організації робіт у виробничій системі.

Часто для розв'язання задач виробничого планування на практиці використовують комбінований підхід, представляючи задачі мережевого планування і розподілу наявних виробничих ресурсів мережі робіт як розширення загальної задачі побудови виробничих розкладів [10].

Будемо вважати, що у виробничій системі задано множину одиниць планування $\{z\}$, $z = 1, \dots, Z$, з портфелю замовлень, представлених технологічними процесами з множини операцій

$$\{o_{zir}\}, z = 1, \dots, Z; i = 1, \dots, I, r = 1, \dots, R.$$

Множина операцій

$$\{o_{zir}\}, z = 1, \dots, Z; i = 1, \dots, I, r = 1, \dots, R$$

визначає множину робіт на мережі $S = \{s\}$, де $s = o_{zir}$ відповідає i -й операції виконання z -го замовлення з використанням ресурсу r -го типу. Також будемо вважати, що виробнича система має множину типів ресурсів $\mathcal{R} = \{r\}$, $r = 1, \dots, R$, в якості яких можуть виступати виробничі ділянки, робочі центри і т.і. Множина \mathcal{R} розглядається як система обслуговування щодо виконання $\{o_{zir}\}$.

Порядок встановлено технологічний реалізації робіт в мережі, який може бути представлений у вигляді мережевого графіка, тобто у вигляді безконтурного орграфа $S = \langle I, *, *, *, V \rangle$ з однією початковою вершиною "*", кінцевою вершиною "**", множиною робіт I та множиною дуг V , що визначають технологічний порядок виконання робіт.

Відповідно до технології, кожна робота i виконується з використанням певного виду ресурсу r -го типу, тобто виконується на обладнанні r -го виробничої ланки, що дозволяє ідентифікувати будь-яку з робіт трійкою $\langle zir \rangle$. При цьому в якості вихідної характеристики роботи $\langle zir \rangle$ є її обсяг w_{zir} (трудомісткість виконання) та інтенсивність виконання N_{zir} . Тут під інтенсивністю роботи $\langle zi \rangle$ розуміється кількість одиниць r -го ресурсу, що виділяється для її виконання. З врахуванням введених характеристик роботи її тривалість t_{zir} визначається як деяка функція вигляду

$$t_{zir} = f(w_{zir}, N_{zir}),$$

зокрема,

$$t_{zir} = w_{zir} / N_{zir}.$$

Тоді, визначаючи τ_{zir}^{noch} як момент часу початку виконання роботи iz , а τ_{zir}^{zag} як момент часу її завершення, формально виробничий розклад процесу виконання того чи іншого замовлення можна представити як множину пар вигляду

$$\langle \tau_{zir}^{noch}, \tau_{zir}^{zag} \rangle, z = 1, \dots, Z, i = 1, \dots, I, r = 1, \dots, R.$$

Введені позначення дозволяють виділити загальну методику формування виробничого розкладу по виконанню замовлень як процедуру, що складається з кроків, які циклічно повторюються:

1) вибрати зі списку нерозглянутих замовлень Z чергове замовлення $\{z\}$ для включення його в розклад і встановити тимчасову точку відліку, що дорівнює номеру дня виконання замовлення;

2) виділити з мережевого графіка замовлення $\{Z\}$ максимальний фронт робіт, що претендують на включення в розклад, тобто таких у яких всі наступні за технологією роботи вже включені в розклад;

3) виділити з сформованого фронту робіт операцію з найбільшою трудомісткістю w_{zir} (дана евристика забезпечує першочергове включення в розклад робіт критичного напрямку);

4) включити в розклад виділену роботу, перевірявши умови наявності для її виконання всіх комплектуючих, необхідних матеріалів, технологічних і допоміжних ресурсів, оснастки, необхідного інструменту, документації, і призначити для її виконання «мінімально достатнє» число одиниць, що звільняється після виконання чергової операції виробничого ресурсу з врахуванням вимог виконання за термінами розглянутого замовлення, недопущення збільшення тривалості критичного напрямку замовлення і забезпечення рівномірності ходу технологічного процесу. Після чого визначаються моменти часу початку і завершення виділеної роботи.

На кожному циклі даної процедури в розклад вбудовується одна робота виділеного замовлення. Отже, після скінченної кількості повторів кроків 2–4, рівного потужності множини операцій $\{o_{zir}\}$, процес побудови розкладу для виділеного замовлення завершиться. При цьому, в разі виявлення дефіциту ресурсу на тій чи іншій ділянці, для виконання будь-якої роботи з множини $\{o_{zir}\}$ всі роботи даної множини виключаються з сформованого розкладу і виконання замовлення розглядається повторно за умови виділення на останню роботу його критичного напрямку більшої (наприклад, на одиницю) величини ресурсу.

Відзначимо, що описана методика побудови розкладів дозволяє, з одного боку, здійснювати виробниче планування з врахуванням діючих на підприємстві технологічних і організаційних обмежень, а з іншого, реалізовувати принципи «витягуючого» (Pull Scheduling) планування, забезпечує виконання замовлень за принципом «just in time» з мінімізацією обсягів незавершеного виробництва.

Запропонована методика має рекурсивний характер та дозволяє будувати виробничі розклади з перевіркою дотримання таких інтегральних критеріїв ефективності розкладів як критерій мінімальної календарної тривалості виконання розкладу, критерій мінімуму вартості виконання розкладів тощо.

При цьому сформований виробничий розклад, орієнтований на процесне представлення загальної схеми організації робіт у виробничій системі, дозволяє здійснити перехід від виробничого планування по часовим інтервалам та цехам до позаказно-орієнтованого менеджменту, а також до побудови на її основі систем процесно-орієнтованого бюджетного планування і позаказно-орієнтованого контролю та управління витратами [10].

Розглянемо нижче власне критерій, який забезпечить неперервність роботи сучасного підприємства. Вважатимемо, що виконано все вищеписане – підприємство працює в умовах ресурсної забезпеченості з чітко запланованими графіками випуску готової продукції. Власне дослідимо як працює даний процес на атомарному рівні. Дослідимо як це працює на рівні окремого виробничого процесу на

певній виробничій ділянці (робочому центрі), що випускає конкретний вид продукції.

Без автоматизації процесу контролю параметрів виробничих процесів на сучасних підприємствах неможливо організувати серійний випуск якісної продукції. Власне, для розв'язання подібних задач на виробничих підприємствах, забезпечення функціональної стійкості виробничих процесів завдяки контролю в режимі реального часу ключових виробничих параметрів пропонується математична модель, яка може бути невід'ємно інтегрованою в автоматизовану систему управління підприємством.

Випуск продукції зазвичай складається з низки етапів, на кожному з яких висуваються певні вимоги до параметрів та характеристик сировини, напів-

фабрикатів чи то в кінцевому підсумку готової продукції. Позначимо такі набори параметрів на кожному i -му етапі $x(i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ (рис. 2).



Рис. 2. Топологія технологічного виробничого процесу

Технологічні виробничі процеси (рис. 3) для гарантування досягнення параметрів $x(i)$ на кожному етапі вимагають зовнішніх впливів на виробничий процес – $u(i)$ (ефект від роботи, енергетичний ефект, хімічні чи то інші технологічні впливи на кожному з етапів).

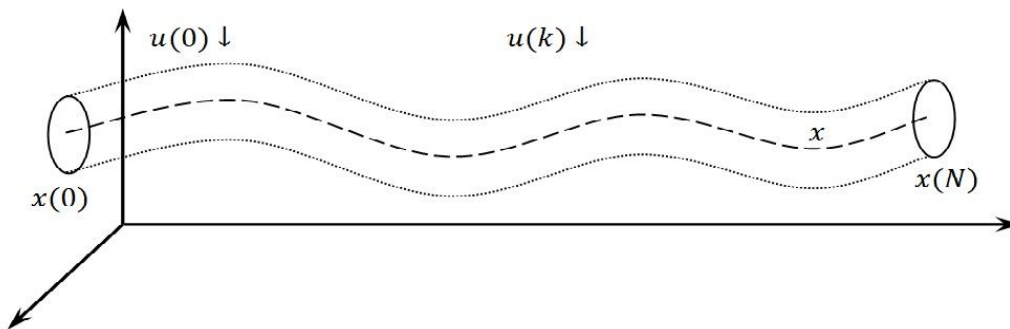


Рис. 3. Схема виконання виробничого процесу

Зрозуміло, що кінцева якість продукції та проміжна кількість на кожному етапі залежить від дотримання технології та забезпечення витримки необхідних параметрів на кожному попередньому кроці. Далі вважатимемо, що ця апріорна вимога виконана.

Зауважимо, що в реальних виробничих умовах хід виробничого процесу забезпечить повторюваність та інтенсивність випуску продукції, яка задовольняє наперед заданим вимогам та стандартам з певними відхиленнями (допусками) $\varepsilon(i)$, які характерні для кожного виробничого процесу чи то виробу взагалі кажучи індивідуально. Тобто, всі лінійні, хімічні, механічні, геометричні чи інші характеристики виробу повинні відповідати еталонному зразку не перевищуючи пороги технологічних похибок. В протилежному випадку, при значних відхиленнях, продукція вважатиметься бракованою, що потягне за собою додаткове виділення ресурсів, оснастки, інструменту, внесення змін у виробничі плани та змінить час виконання всього замовлення (тобто, знову виникне необхідність виконання вищеписаних процедур).

Також позначимо:

$A(i)$ – матрицю залежності показників якості продукції на $i+1$ -му етапі від показників на i -му етапі, власне матриця виробничого процесу;

$C(i)$ – матрицю, яка визначає структуру впливу на виробничий процес $u(i)$.

Тоді математична модель технологічного процесу можна записати таким чином:

$$x(i+1) = A(i)x(i) + C(i)u(i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

$$x(i) \in \mathbb{R}^n, \quad A(i) \in \mathbb{R}^{n \times n},$$

$$C(i) \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad u(i) \in \mathbb{R}^n.$$

Представимо (1) у вигляді

$$Ax = Cu. \quad (2)$$

Таке представлення демонструє, що всі етапи технологічного виробничого процесу можуть бути описані системою алгебраїчних рівнянь (2), де:

$$x = \begin{pmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times N},$$

$$u = \begin{pmatrix} u(0) \\ u(1) \\ \vdots \\ u(N-1) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times N}.$$

$$C = \begin{pmatrix} C(0) & \dots & 0 \\ 0 & C(2) & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C(3) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C(N-1) \end{pmatrix} -$$

блочна матриця $(Nn) \times (Nm)$.

$$A = \begin{pmatrix} -A(0) & E & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -A(1) & E & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -A(2) & E & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A(N-1) & E \end{pmatrix} -$$

матриця $((N-1)n) \times ((N+1)n)$.

При цьому матриці A та C визначають топологію виробничого процесу.

Вектор u описує технологічні особливості виробничого процесу.

Нехай $\bar{x} = \begin{pmatrix} \bar{x}(0) \\ \bar{x}(1) \\ \vdots \\ \bar{x}(N) \end{pmatrix}$ – еталонний процес. Ета-

лонний процес гарантує повну відповідність набору параметрів $x(k)$, $k=0,1,\dots,N$, які мають бути дотримані при ідеальному виконанні виробничого процесу на всіх етапах та на кожній з ланок. Тобто, це певне медіанне значення, яке водночас передбачає наявність апріорної сукупності допустимих відхилень параметрів системи.

Задано параметр $\varepsilon > 0$, що визначає сукупність допустимих відхилень (толерансів) від еталонних значень.

Означення 1. Якщо при заданих матрицях A , C та векторі u існує розв'язок $x = \bar{x} + e$ системи (2) такий, що $\|e\| \leq \varepsilon$, то такий технологічний процес називатимемо функціонально стійким.

Позначимо

$$Z(A^T) = E - AA^+ -$$

проектор на ядро матриці A^T , A^+ – псевдообернена матриця [11].

Справджується теорема.

Теорема 1. Нехай виконується умова

$$u^T Q u = 0, \quad (3)$$

де $Q = C^T Z(A^T) C$. При цьому

$$\|A^+(Cu - A\bar{x})\| \leq \varepsilon. \quad (4)$$

Тоді технологічний процес, описаний рівнянням (2), є функціонально стійким.

Доведення. Нехай $u^T Q u = 0$. Врахуємо, що AA^+ – симетрична матриця і $Z^T(A^T) = Z(A^T)$ [11].

Так як $Z(A^T)$ – проектор, то

$$Z^2(A^T) = Z(A^T).$$

Тоді з (3) випливає

$$\begin{aligned} u^T Q u &= u^T C^T Z(A^T) C u = \\ &= u^T C^T Z^T(A^T) Z(A^T) C u = 0. \end{aligned}$$

Звідси

$$\|Z(A^T) C u\|^2 = 0 \text{ і } Z(A^T) C u = 0.$$

Оскільки

$$Z(A^T) = E - AA^+,$$

то

$$(C - AA^+ C) u = 0.$$

Як наслідок, $AA^+ C u = C u$. Тоді

$$AA^+ C u - A\bar{x} = C u - A\bar{x}.$$

Оскільки $A = AA^+ A$ [11], то

$$\begin{aligned} AA^+ C u - A\bar{x} &= \\ &= AA^+ C u - AA^+ A\bar{x} = AA^+ (C u - A\bar{x}). \end{aligned}$$

Тому

$$AA^+ (C u - A\bar{x}) = C u - A\bar{x}.$$

Це означає, що $C u - A\bar{x} \in \text{Im } A$ [11]. Звідси випливає, що існує $e \in \mathbb{R}^n$ таке, що

$$Ae = C u - A\bar{x}. \quad (5)$$

З (5) одержуємо

$$A(e + \bar{x}) = C u.$$

Отже, вектор $e + \bar{x}$ є розв'язком (2). Оскільки виконується (5) та $e \in \text{Im } A$, то

$$e \in \{A^+(C u - A\bar{x}) + v\}, \quad (6)$$

де $v \in \text{Ker}(A)$, тобто $Av = 0$ [11]. Серед векторів сукупності (6) найменше за нормою значення вектора e досягається при $v = 0$, а саме [11]

$$e = A^+(C u - A\bar{x}).$$

Оскільки має місце (4), то $\|e\| \leq \varepsilon$, $x = \bar{x} + e$. Отже, технологічний процес є функціонально стійким. Теорему доведено.

Справджується також обернена теорема до теореми 1.

Теорема 2. Якщо технологічний процес є функціонально стійким, то

$$u^T Q u = 0,$$

при цьому

$$\|A^+(C u - A\bar{x})\| \leq \varepsilon.$$

Доведення. З умови теореми 2 випливає, що існує розв'язок системи (2) $x = \bar{x} + e$, $\|e\| \leq \varepsilon$, де $Ax = C u$. Отже $A(\bar{x} + e) = C u$.

Звідси випливає

$$Ae = Cu - A\bar{x}. \quad (7)$$

За означенням образу матриці $Cu - A\bar{x} \in \text{Im } A$. Тому одержуємо [11]

$$AA^+(Cu - A\bar{x}) = Cu - A\bar{x}.$$

Таким чином

$$AA^+Cu - AA^+A\bar{x} = Cu - A\bar{x}.$$

Але $AA^+A = A$ [11], тому $AA^+Cu = Cu$. Звідси $(E - AA^+)Cu = 0$.

Отже

$$Z(A^T)Cu = 0 \text{ і } \|Z(A^T)Cu\|^2 = 0.$$

Таким чином $u^T C^T Z^T (A^T) Z(A^T) C^T u = 0$ і $u^T Qu = 0$. З формули (7) випливає, що [11]

$$e \in \{A^+(Cu - A\bar{x}) + Z(A)v, v \in \mathbb{R}^{n_{\text{CN}}}\}.$$

Оскільки

$$\|A^+(Cu - A\bar{x})\| \leq \varepsilon,$$

то при $v = 0$ $\exists e$ таке, що $\|e\| \leq \varepsilon$. Теорему доведено.

Якщо розв'язок системи (2), який відповідає умовам функціональної стійкості не існує, це означає, процес не може гарантовано реалізуватися. В такому випадку технологічний процес слід зупинити, щоб проаналізувати, які параметри призводять до функціональної нестійкості.

При цьому розв'язуємо задачу

$$I(e) = \|Ae - Cu - A\bar{x}\| \rightarrow \min_e. \quad (8)$$

Розв'язком даної задачі мінімізації є сукупність векторів [11]

$$e \in \{A^+(Cu - A\bar{x}) + Z(A)v, v \in \mathbb{R}^{n_{\text{CN}}}\}.$$

при цьому вектор

$$e = A^+(Cu - A\bar{x})$$

має найменшу норму [11]. Власне він фактично окреслює гранично допустиму межу відхилень від еталонного значення. В разі подальшого зростання відхилень, процес потрібно негайно припинити, адже при цьому процес продукувати неприпустимі відхилення заданих стандартів.

На практиці це означає, що існування точного розв'язку системи гарантує функціональну стійкість системи, якщо відхилення від еталонного значення задовольняють (4), то виробничий процес функціонально стійкий випускаючи продукцію згідно зі стандартом з дотриманням гарантованих технологічних допусків, якщо ж умова (4) не виконується, проте існує розв'язок (8) це означає, що система функціонує в умовах близьких до втрати стійкості (технологічно це означає, що процес забезпечує випуск продукції неналежної якості, яка буде

обов'язково дефектована, наприклад, продукції буде присвоєно низький ґатунок, розряд тощо). Якщо не має розв'язків задачі (8), то процес має бути негайно зупинений.

Система повернеться у вихідне положення на рівень функціональних задач APS, MES, PLM-систем ІАСУ та застосовується вище описаний алгоритм повторного планування та рестарту скоректованого виробничого плану.

Припустимо, що ми маємо еталонні показники значення вектора \bar{x} .

Актуальною є задача, чи можливо організувати виробничий процес таким чином, щоб дотримуватись заданих еталонних показників за рахунок вибору вектора u ?

Тобто пропонується механізм, який в реальній практиці з методикою, що забезпечує дотримання технологічних вимог на всіх етапах виробничого процесу.

Справджуються наступні твердження.

Теорема 3. Нехай структура виробничого процесу визначається матрицями A та C , а вектором \bar{x} задані еталонні значення параметрів x та характеристик продукції в кінці кожного етапу виробництва. Тоді необхідною і достатньою умовою того, що у виробничому процесі будуть реалізовані еталонні вимоги \bar{x} є виконання умови

$$\bar{x}^T P \bar{x} = 0, \quad (9)$$

де матриця

$$P = A^T Z(C^T)A, \quad Z(C^T) = E - CC^+.$$

Доведення. Для того, щоб еталонні показники \bar{x} були реалізовані необхідно і достатньо щоб існував вектор u для якого виконується співвідношення (2). Ця умова еквівалентна тому, що

$$A\bar{x} \in \text{Im } C. \quad (10)$$

де $\text{Im } C$ – образ оператора C . Позначимо $Y(C) = CC^+$ – матрицю ортогонального проектування на півпростір $\text{Im } C$ [11]. Тоді умова (10) еквівалентна виконанню рівності

$$Y(C)A\bar{x} = A\bar{x}. \quad (11)$$

Звідси $CC^+A\bar{x} = A\bar{x}$ й

$$(E - CC^+)A\bar{x} = 0. \quad (12)$$

Оскільки $Z(C^T) = E - CC^+$, то $Z(C^T)A\bar{x} = 0$.

Отже $\|Z(C^T)A\bar{x}\|^2 = 0$, звідки

$$\bar{x}^T A^T Z^T (C^T) Z(C^T) A\bar{x} = \bar{x}^T A^T Z(C^T) A\bar{x} = 0. \quad (13)$$

Таким способом одержуємо (5). І навпаки, виконання (13) впливає (12) і звідси (11). Отже $A\bar{x} \in \text{Im } C$, тобто $\exists u$ таке, що $A\bar{x} = Cu$. Теорему доведено.

Наслідок 1. Нехай виконуються умова (9) теорему 3. Тоді сукупність реалізації вектора u за ета-

лонними значеннями вектора \bar{x} визначається співвідношенням

$$C^+ A\bar{x} + Z(C)w : w \in R^{n^{\text{ЧН}}},$$

де $Z(C) = E - C^+C$ – оператор проектування на ядро матриці C .

Висновок

Підсумовуючи наведені міркування необхідно зазначити, що в даній роботі проведено аналіз проблеми створення інформаційних систем управління підприємством та на його підставі запропоновано методику побудови систем автоматизованого

керування підприємством. Викладено особливості авторського підходу до вирішення задач виробничого планування, як пріоритетної складової в системі управління.

Зокрема, в роботі запропоновано математичну модель технологічного процесу на промисловому підприємстві. Вводиться поняття та умови функціональної стійкості технологічного процесу на промисловому підприємстві. Вказуються критерії функціональної стійкості технологічного процесу. Викладений теоретичний матеріал може слугувати підґрунтям створення єдиного інформаційного простору на виробничому підприємстві з функціонально стійким технологічним процесом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Машков О.А., Аль-Тамімі Р.К.Н., Ламі Д.Д.Х., Косенко В.Р. Застосування неформальних підходів до управління складними динамічними системами. Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». Полтава: ПНТУ, 2015. Вип. 4 (36). С. 31 – 37.
2. Барабаш О.В., Мусієнко А.П., Саланда І.П. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж. Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». Полтава: ПНТУ, 2017. Вип. 1 (41). С. 122 – 126.
3. A.P. Musienko, O.V. Barabash, N.V. Lukova-Chuiko, I.P. Salanda Diagnostic model of wireless sensor network based on the random test of checks. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, 2018. – VI (18), Issue 158, Budapest, Hungary, pp. 25 – 28.
4. Кучук Г.А., Королев А.В., Пашнев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. Харків: ХВУ, 2003. 224 с.
5. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення // Харків: ХУ ПС, 2013. 264 с.
6. V.A. Mashkov, O.V. Barabash Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel Engineering Simulation. – Amsterdam: OPA, 1998. Vol. 15. pp. 43 – 51.
7. Савченко А.В., Кравець В.О., Шевцова В.В. Аналіз методів побудови функції належності при обробці експертних знань. Вісник НТУ «ХП». Сер.: Техніка та електрофізика високих напруг. Х.: НТУ «ХП». 2012. № 52 (958). С. 126 – 132.
8. Додонов А.Г., Кузнецова М.Г., Горбачик Е.С. Введение в теорию живучести вычислительных систем // Отв. Ред. Гуляев В.А.; АН УСССР. Ин-т проблем регистрации информации. Киев: Наукова думка, 1990. 184 с.
9. Рубан И.В., Лукова-Чуйко Н.В., Мартовицкий В.А. Подход к классификации состояния сети на основе статистических параметров для обнаружения аномалий в информационной структуре вычислительной системы. Кибернетика и системный анализ. 2018. Том 54, № 2. С. 142 – 150.
10. Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. 372 с.
11. Albert, Arthur Regression and the Moore-Penrose pseudoinverse. Burlington, MA: Elsevier, 1972. 195 p.

Надійшла (received) 22.10.2019

Прийнята до друку (accepted for publication) 20.11.2019

Method of creating a single information space in a production enterprise with a functionally sustainable technological process

V. Sobchuk

Abstract. This paper analyzes the existing techniques for managing an industrial enterprise. The most famous of these are the following regulatory documents: MRP II (Manufacturing Resource Planning), ERP (Enterprise Resource Planning), APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) and MES (Manufacturing Execution Systems). The main advantages and disadvantages of these management systems are outlined. The analysis shows the need to create new generation of management systems, which is closely related to the development of the method to create a single enterprise information space and integrated models for automated enterprise management systems. A methodology based on a systematic approach that provides formalized descriptions of the entire set of production and business processes is proposed; material objects and resources involved in the operational management of production and its design and technological preparation. This technique of creating a single information space is supported by the relevant basic information technologies that provide: reengineering of business processes of operational management and technical preparation of production in order to ensure the transition from functionally oriented to process organization of enterprise management; description and visual presentation of the electronic structure of the product and giving it the status of an enterprise standard; management of business processes of operational planning and technical preparation of production with the use of electronic product structure, aimed at supporting the functional tasks of APS, MES, PLM-systems. In particular, the paper deals with the mathematical model of technological process in an industrial enterprise. The concept and conditions of functional stability of technological process in an industrial enterprise are introduced. The criteria of functional stability of technological process are specified.

Keywords: production enterprise management, management standards, operational and production planning, network models, methods of theory of functional stability.

Я. В. Тарасенко

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

МЕТОД КОНТЕНТ-АНАЛІЗУ СЕМАНТИЧНОЇ ЧАСТКИ В ТЕКСТАХ З ОЗНАКАМИ ПСИХОЛІНГВІСТИЧНОГО ВПЛИВУ

Анотація. В статті вирішено актуальну науково-практичну задачу прискорення контент-аналізу преси без використання експрес-підходу. В роботі вирішені такі задачі, як адаптація основних складових контент-аналітичного дослідження до аналізу семантичної частки на основі дослідження розподілу синонімічних конструкцій за рахунок підсумовуючого підходу контент-аналізу; розподіл семантичних часток за категоріальними ознаками на основі традиційного підходу контент-аналізу для розподілу ядер семантики за логічними рівнями я-концепції; визначення відповідності семантичної частки логічного рівня саме пропагандисту на основі орієнтованого підходу контент-аналізу шляхом дослідження специфіки використання синонімів. В результаті дослідження вперше розроблено метод контент-аналізу семантичної частки в текстах з ознаками психолінгвістичного впливу на основі комплексного використання традиційного, підсумовуючого та орієнтованого підходів контент-аналізу за рахунок дослідження тематичної диференціації синонімічних конструкцій на основі дискурсного аналізу тексту, що дозволило адаптувати методику семантичного контент-аналізу до квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу і, таким чином, прискорити контент-аналіз преси. Результати можливо використовувати для інтерпретації семантичної частки та виявлення закономірностей у світах сприйняття семантичної частки.

Ключові слова: контент-аналіз, семантична частка, ядро семантики, категорії психолінгвістичного портрету, диференціація синонімів, психолінгвістичний вплив.

Постановка проблеми

Постановка проблеми. В умовах вільного поширення інформації та спрощення доступу до неї, все складніше проводити аналіз потоку даних та виявляти певні статистичні залежності в семантичній складовій тексту. Це відкриває шляхи до майже безперешкодного здійснення психологічного впливу на свідомість громадян, що в свою чергу є джерелом небезпеки для держави в цілому. В роботі [1] наголошується на необхідності здійснення саме цільового впливу на підсвідомість зловмисника, тобто особи чи групи осіб, що вчиняють певні дії з метою маніпуляції свідомістю та активністю громадян. Це означає, що задача урівноваження пропагандистського впливу, шляхом здійснення зворотного впливу на пропагандиста є актуальною. Однак, актуальною є і інша задача, що полягає в унеможливленні використання розроблених контрзаходів зловмисником. Отже, подібні контрзаходи повинні бути націлені на протидію саме пропагандисту. При цьому, не слід забувати і про той факт, що наявність ознак пропаганди у тексті не завжди означають написання цього тексту з пропагандистською метою, виходячи із зазначеного в [2]. У вирішенні цього може допомогти використання узагальненого психолінгвістичного портрету пропагандиста. Однак, в умовах невідомих категорій семантичної частки психологічного портрету особистості виникає потреба проведення контент-аналізу широкого спектру джерел для виділення семантичних маніпулятивних структур. Також необхідність створення методу зумовлено потребою аналізу результатів застосування методики протидії текстовій пропаганді та коригування побудови тексту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Виходячи із [3], контент-аналіз передбачає визначення необхідних категорій та якісних характеристик певного об'єкту тексту з подальшою квантифі-

кацією цих характеристик та їх кількісним аналізом, що є критично важливим при формуванні психолінгвістичного портрету пропагандиста та виявленні пропагандистського тексту, особливо із застосуванням квантово-семантичного методу психолінгвістичного аналізу тексту пропагандного дискурсу [4]. При цьому пропонується використання так званого якісного контент-аналізу. Враховуючи той факт, що пропаганда в більшій мірі застосовується у текстах ЗМІ, а в першу чергу в газетах та новинних веб-сайтах, отже і аналізувати необхідно саме ці джерела. В [5] зазначається, що контент-аналіз подібних джерел вимагає значної затрати часу, а тому пропонується використання експрес-аналізу. Однак, у випадку дослідження семантичної частки такий підхід не виправданий, оскільки є занадто спрощеним варіантом.

Існуючі методи контент-аналізу, що базуються на дослідженні граматичних та синтаксичних конструкцій [6-8] спеціалізуються на пошуку певних слів-маркерів, ключових фраз, синтаксичних конструкцій, однак цього не досить для проведення контекстуального дослідження та дослідження семантичного ядра і семантичної частки в умовах квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу. При цьому, сучасні методи семантичного контент-аналізу [9-10] не розглядають семантику з точки зору квантово-семантичного аналізу, що є критичним в проведенні контент-аналізу семантичної частки.

В роботі [11] описано висхідну схему рівнів абстракції в процесі контент-аналізу, однією з яких є категорія. Визначення категорії необхідно для класифікації притаманних саме пропагандисту семантичних часток. При цьому, необхідність та можливість проведення контент-аналізу для проведення заходів контрпропаганди в ході дослідження психологічних властивостей особистості доведено дослідженням [12]. При цьому необхідно використовувати

ти елементи усіх трьох підходів до контент-аналізу [13] шляхом використання методів дискурсного дослідження тексту, як наприклад [14]. Однак, переш за все, необхідно враховувати особливості особистості, використовуючи контент аналіз я-концепції особистості [15].

Метою статті є прискорення контент-аналізу преси без використання експрес-підходу шляхом адаптації методики семантичного контент-аналізу до квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу для розробки методу контент-аналізу семантичної частки.

Для досягнення мети поставлено **такі задачі**: адаптація основних складових контент-аналітичного дослідження до аналізу семантичної частки; розподіл семантичних часток за категоріальними ознаками; визначення відповідності семантичної частки логічного рівня саме пропагандисту.

Виклад основного матеріалу

Виходячи з вимог, висунутих задачами дослідження, метод складається з трьох етапів: визначення основних складових контент-аналітичного дослідження за рівнями абстракції, формування я-концепції особистості за ядрами семантики, кореляція семантичної частки з маніпулятивними структурами.

Етап 1. Визначення основних складових контент-аналітичного дослідження за рівнями абстракції. Як вже зазначалось, в [11] описується висхідний розвиток рівнів абстракції при контент-аналізі: одиниця значення, скорочена одиниця, код, категорія та підкатегорія, тема. Однак, в умовах дослідження семантичної частки шляхом визначення контекстуального зв'язку ядра семантики та вказівника, ієрархія категоріальних ознак сприяє визначенню контекстуального зв'язку [1]. Таким чином, перш за все слід визначити тему та підтему тексту, переходити до визначення скороченої одиниці, використовуючи при цьому підсумовуючий підхід та виділення категоріальної ієрархії. Основуючись на підході дослідження розподілу синонімічних конструкцій, що використовується при скороченні тексту [16], можна визначити основну тему та підтеми тексту, використовуючи початковий одиничний елемент тексту та ядро семантики, на яке він вказує.

Нехай O_{0_n} – початковий одиничний об'єкт тексту. Усі O_{0_n} розподіляються по m групах, основується на гіпотетичній можливості кожного елемента виступати індикатором для ядра семантики. Таким чином, утворюються множина синонімічних початкових елементів $O_{0_n}^m$. Основна тема тексту

$O_{0_n}^m$ визначатиметься за формулою:

$$O_{0_n}^m = \sum_{k=1}^m O_{0_n}^k, \quad (1)$$

причому $|O_{0_n}^m| > |O_{0_n}^k|$.

Звідси слідує, що головна тема буде мати найбільшу кількість синонімічних початкових елементів у групі. Решта груп буде підтемами. Згідно синонімічного словнику [17], кожен синонім володіє тематичною диференціацією. Таким чином, якщо обрати тематику за певними частинами мови, можливо скласти осмислену лінгвістичну інтерпретацію теми тексту за формулою:

$$O'_{0_{text}} = O_{0_{noun}} + O_{0_{verb}} + O_{0_{adj}}, \quad (2)$$

при

$$O_{0_{noun}} \in L_{noun}, O_{0_{verb}} \in L_{verb}, O_{0_{adj}} \in L_{adjective},$$

де L_{noun} – множина синонімів іменників за тематичним спрямуванням, а L_{verb} та L_{adj} – дієслів та прикметників відповідно.

Аналогічно формуються підтеми $O_{0_n}^m$.

Наступним кроком є скорочення тексту та виділення основної неподільної семантичної частки. Таким чином, слід проводити згортку на основі предикативної конструкції (як такої, що володіє найбільш важливим семантичним значенням), що належить до відповідної синонімічної тематики, а новий текст слід формувати за формулою:

$$T = \frac{\prod_{k=1}^n (G+H)_k}{\prod_{k=1}^m (G'+H')_k} + \sum_{i=1}^b R_i, \quad (3)$$

де $(G+H)$ – предикативна конструкція, що складається з G – підмету та H – присудку, n – загальна кількість предикативних конструкцій, m – кількість предикативних конструкцій, що, не пов'язані з синонімічною тематикою ($G' \notin L_{noun}$, а $H' \notin L_{verb}$), R – другорядні члени речення, що пов'язані з предикативною конструкцією за допомогою лексичної функції (видалення спричинить втрату семантичного відтинку частини тексту), b – кількість лексичних функцій-зв'язок.

Наступним кроком є виділення категорій та підкатегорій семантичного ядра, що належить автору тексту.

Таким чином, якщо B^1 є найвищим категоріальним значенням, тоді повинна виконуватись умова:

$$B^1 \in \left[(G+H)O_{0_n}^m + R^b \right], \quad (4)$$

а підкатегорії повинні задовольняти умові:

$$B^m \in \left[(G+H)O_{0_n}^m + R^b \right], \quad (5)$$

однак при цьому буде отримано m рівноправних підкатегорій. Важливо також визначити підкатегорії вищого порядку, у зв'язку зі взаємною підпорядкованістю отриманих підкатегорій.

Якщо врахувати розподіл тематичних синонімів у словнику за групами, які в свою чергу поділяються на тематичні блоки, тоді підпорядкованість визначатиметься за принципом:

$$B^{m_t} = \{x^t \in c^t \mid x^t \in O_{0_n}^m\}, \quad (6)$$

де x^t – блок номер t , що належить до групи c з номером t' . Таким чином, враховується як група та блок синонімічного словнику, так і синонімічна група конкретного тексту.

Етап 2. Формування я-концепції особистості за ядрами семантики. Відповідно до я-концепції особистості [15], виявлені та розподілені за синонімічними категоріями ядра семантики, слід розподіляти за логічними рівнями: оточення (M_1), поведінки (M_1), можливостей (M_1), переконання та цінності (M_1), особиста своєрідність (M_5). Для цього необхідно використовувати методику дискурсного аналізу [14], яка була вдосконалена у [4] з метою визначення атрибуту інформаційно-психологічного протиборства.

Таким чином, множина часток рівня оточення визначатиметься за формулою:

$$M_1 = \left\{ B_1^{m_t} \in O_{0_n}^m \left(D^{Z_{x_1}} \right) \in Q_n \mid \max_{[a;b]} F \left[H \left(B_1^{m_t} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

де Q_n – множина синонімічних конструкцій з ознаками психологічного впливу D^{Z_x} – ядро семантики, на яке вказує початковий одиничний об'єкт з ієрархії підтем тексту $O_{0_n}^m$, при чому, на ядро семантики вказує категоріальне значення $B_1^{m_t}$ на основі контекстуального зв'язку. Z_{x_1} – множина знайдених вузлів рівня x в ієрархії дискурсного дерева, що співвідносяться з синонімічною множиною тематичних синонімів 1, яка відповідає за індикацію категорії оточення. $F[H(B_1^{m_t})]$ – функція, яка описується кривою, проведеною за множиною величин ентропії категоріальних значень $B_1^{m_t}$ рівня оточення на відрізьку від a до b за часовою лінією розвитку семантики тексту відповідно до законів логіки.

Аналогічні дії проводяться і з ядрами наступних рівнів я-концепції. Таким чином, для обрахування рівня поведінки слід використати формулу (7), змінену відповідно до множини тематичних синонімів 2, яка відповідає за індикацію ядра поведінки:

$$M_2 = \left\{ B_2^{m_t} \in O_{0_n}^m \left(D^{Z_{x_2}} \right) \in Q_n \mid \max_{[a;b]} F \left[H \left(B_2^{m_t} \right) \right] \right\}, \quad (8)$$

де Z_{x_2} – множина знайдених вузлів рівня x в ієрархії дискурсного дерева, що співвідносяться з сино-

німічною множиною тематичних синонімів 2, яка відповідає за індикацію категорії поведінки.

Рівень можливостей визначатиметься за формулою:

$$M_3 = \{B_3^{m_t} \in O_{0_n}^m (D^{Z_{x_3}}) \in Q_n \mid \max_{[a;b]} F[H(B_3^{m_t})]\}, \quad (9)$$

де Z_{x_3} – множина знайдених вузлів рівня x в ієрархії дискурсного дерева, що співвідносяться з синонімічною множиною тематичних синонімів 3, яка відповідає за індикацію категорії можливостей.

Рівень переконань та цінностей визначатиметься формулою:

$$M_4 = \{B_4^{m_t} \in O_{0_n}^m (D^{Z_{x_4}}) \in Q_n \mid \max_{[a;b]} F[H(B_4^{m_t})]\} \quad (10)$$

де Z_{x_4} – множина знайдених вузлів рівня x в ієрархії дискурсного дерева, що співвідносяться з синонімічною множиною тематичних синонімів 4, яка відповідає за індикацію категорії переконань та цінностей.

Рівень особистої своєрідності визначатиметься формулою:

$$M_5 = \{B_5^{m_t} \in O_{0_n}^m (D^{Z_{x_5}}) \in Q_n \mid \max_{[a;b]} F[H(B_5^{m_t})]\} \quad (11)$$

де Z_{x_5} – множина знайдених вузлів рівня x в ієрархії дискурсного дерева, що співвідносяться з синонімічною множиною тематичних синонімів 5, яка відповідає за індикацію категорії особистої своєрідності.

Таким чином, для отримання повної картини категоріальних критеріїв, що характеризують особистість автора тексту з ознаками психолінгвістичного впливу відповідно до проаналізованої семантичної частки необхідно об'єднати усі отримані множини логічних рівнів я-концепції особистості:

$$M_j = M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4 \cup M_5, \quad (12)$$

Однак, це стосується окремого автора одного чи декількох текстів. Для того, щоб відповідати меті статті, необхідно знайти узагальнені категоріальні ознаки усіх авторів текстів, які є матеріалом для проведення контент-аналізу. Таким чином, множина узагальнених категоріальних ознак M' психолінгвістичного портрету пропагандиста в усіх досліджуваних текстах може бути отримана за формулою:

$$M' = M_{j_1} \cap M_{j_2} \cap \dots \cap M_{j_e}, \quad (13)$$

де M_{j_e} – множина категоріальних критеріїв, що характеризують особистість кожного з e авторів текстів з ознаками психолінгвістичного впливу.

Етап 3. Кореляція семантичної частки з маніпулятивними структурами. Як вже було згадано, в процесі контент-аналізу семантичної частки необхідно використовувати усі три підходи контент-аналізу в комплексі. Підсумовуючий підхід було використано при скороченні тексту, традиційний підхід – під час виділення категоріальних ознак

безпосередньо з тексту при розподіленні ядер семантики за логічними рівнями. Третій підхід – орієнтований та відрізняється проведенням попереднього дослідження тексту, результати якого можуть лягти в основу контент-аналізу. Його можливо використати при визначенні приналежності семантичної частки логічного рівня саме пропагандисту.

Спершу проводиться визначення множини синонімічних категорій тематичного словника синонімів у конкретному тексті (V') за формулою (14):

$$V' = \{S^n \in V \mid S^n \in B^{m_t}\}, \quad (14)$$

де S^n – множина n синонімів однієї групи та блоку, вжитих у тексті та які належать множині синонімічних категорій тематичного словника синонімів V .

Таким чином, можна отримати множину синонімічних категорій, притаманних конкретному тексту з метою подальшої диференціації їх з огляду використання в семантичній частці, враховуючи особливості узагальнених категоріальних ознак психолінгвістичного портрету пропагандиста. Інакше кажучи, буде отримано множину синонімічних категорій, яку можна дослідити на технологічні особливості вживання синонімічних конструкцій, що, в свою чергу може бути притаманно конкретно пропагандисту.

Наступним кроком є проведення аналізу розподілу синонімічних ядер семантики (15):

$$D^{Z_x} = V' \cup (D^{Z_x} \cap M'), \quad (15)$$

де D^{Z_x} – множина синонімічних ядер семантики при Z_x – множині знайдених вузлів рівня x в ієрархії дискурсного дерева. При цьому враховуються конструкції, які володіють ознаками психолінгвістичного впливу, що, в свою чергу дозволить використовувати метод виключно з метою визначення категоріальних ознак у тексті, в якому присутні елементи психолінгвістичного впливу. Звідси слідує можливість проведення контент-аналізу виділених семантичних маніпулятивних структур.

Відсоткове значення приналежності семантичної частки пропагандисту (P) ґрунтується на відхиленнях частотності вживання відповідної синонімічної категорії та визначатиметься з формулою (16):

$$P = \frac{\left| \ln\left(\frac{Freq_{V'}}{Freq_V}\right) \right|}{b} \cdot 100, \quad (16)$$

де $Freq_{V'}$ – частота вживання елемента множини V' синонімічних категорій тематичного словника синонімів у конкретному тексті, $Freq_V$ – середня частота вживання елемента множини V синонімічних категорій тематичного словника синонімів у загальному випадку. При цьому b – коефіцієнт точності $b \approx 4,605$.

Таким чином, проводяться попередні розрахунки для подальшого визначення відповідності семантичної частки логічного рівня саме пропагандисту.

Для виконання поставленої задачі необхідно формування множини категорій семантичного ядра, що може бути проведене за формулою (17):

$$B_n^{m_t} = \{D^{Z_x} \in V' \mid P > 50\}. \quad (17)$$

Таким чином, при визначенні категорій семантичного ядра враховується як синонімічний розподіл, так і приналежність семантичної частки пропагандисту.

Висновки

У статті вирішено актуальну науково-практичну задачу прискорення контент-аналізу преси без використання експрес-підходу на основі розробки методу контент-аналізу семантичної частки.

Адаптація основних складових контент-аналітичного дослідження до аналізу семантичної частки проводилась шляхом визначення ієрархії категоріальних ознак семантичної частки на основі дослідження розподілу синонімічних конструкцій за рахунок підсумовуючого підходу контент-аналізу, що дозволило визначити множину контент-залежної категоріальної ієрархії ядра семантичної частки.

Розподіл семантичних часток за категоріальними ознаками проводився на основі традиційного підходу контент-аналізу для розподілу ядер семантики за логічними рівнями я-концепції особистості шляхом дискурсного дослідження за рахунок визначення атрибуту інформаційно-психологічного протисторства, що дозволило отримати множину узагальнених категоріальних ознак психолінгвістичного портрету пропагандиста. Визначення відповідності семантичної частки логічного рівня саме пропагандисту проводилось на основі орієнтованого підходу контент-аналізу шляхом дослідження технологічних особливостей вживання синонімічних конструкцій за рахунок визначення приналежності семантичної частки пропагандисту, що дозволить використовувати метод виключно з метою визначення категоріальних ознак у тексті, де присутні елементи психолінгвістичного впливу.

Вперше розроблено метод контент-аналізу семантичної частки в текстах з ознаками психолінгвістичного впливу на основі комплексного використання традиційного, підсумовуючого та орієнтованого підходів контент-аналізу за рахунок дослідження тематичної диференціації синонімічних конструкцій на основі дискурсного аналізу тексту завдяки визначеному атрибуту інформаційно-психологічного протисторства, що дозволило адаптувати методіку семантичного контент-аналізу до квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу і, таким чином, прискорити контент-аналіз преси без використання експрес-підходу.

Подальшого дослідження потребує процес контент-аналізу семантичної частки коротких повідомлень в онлайн-спільнотах та інших стилів тексту, окрім публіцистичного. Результати можливо використовувати для інтерпретації семантичної частки та виявлення закономірностей у світах сприйняття семантичної частки. Крім того, розроблений метод дозволить проводити контент-аналіз широкого спе-

ктру джерел для виділення семантичних маніпулятивних структур, що забезпечить можливість аналізу результатів застосування методики протидії текстовій пропаганди.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тарасенко Я.В. Визначення координат семантичної частки в англомовному тексті при відомому психолінгвістичному портреті пропагандиста / Я.В. Тарасенко // *Захист інформації*. – 2019. – Том 21, № 3. – С. 168-174.
2. Krippendorff K. *Content analysis: an introduction to its methodology* – 4th ed. / K. Krippendorff. – Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018. – 472 p.
3. Кирпиков А.Р. Качественный контент-анализ как метод исследования / А.Р. Кирпиков // XXI Международная конференция памяти профессора Л.Н. Когана «Культура, личность, общество в современном мире: методология, опыт эмпирического исследования», 22-23 марта 2018 г., Екатеринбург. – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 67-74.
4. Тарасенко Я.В. Метод квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу англомовного тексту пропагандного дискурсу / Я.В. Тарасенко // *Сучасні інформаційні системи*. – 2019. – Том 3, № 4. – С. 62-68.
5. Чернобровкина Е.П. Контент-анализ в лингвистических исследованиях / Е.П. Чернобровкина // *Вестник Бурятского государственного университета. Язык. Литература. Культура*. – 2011. – № 11. – С. 125-129.
6. Gottschalk L.A. *Content Analysis of Verbal Behavior: New Findings and Clinical Applications* / L.A. Gottschalk. – Abingdon: Routledge, 2013. – 234 p.
7. Goldenstein J. Analyzing Meaning in Big Data: Performing a Map Analysis Using Grammatical Parsing and Topic Modeling / J. Goldenstein, P. Poschmann // *Sociological Methodology*. – 2019. – Vol. 49, Issue 1. – P. 83-131.
8. van Atteveldt W. Clause Analysis: Using Syntactic Information to Automatically Extract Source, Subject, and Predicate from Texts with an Application to the 2008–2009 Gaza War / W. Atteveldt, T. Sheaffer, S. R. Shenhav Y. Fogel-Dror // *Political Analysis*. – 2017. – Vol. 25, Issue 2. – P. 207-222.
9. Yu F. Semantic content analysis and annotation of histological images / F. Yu, HH. Ip // *Computers in Biology and Medicine*. – 2008. – Volume 38, Issue 6. – P. 635-649.
10. Mozhaev O. Multiservice network security metric / O. Mozhaev, H. Kuchuk, N. Kuchuk, M. Mozhaev, M. Lohvynenco // *IEEE Advanced information and communication technologies-2017. Proc. of the 2th Int. Conf.* – Lviv, 2017. – P. 133-136.
11. Главчева Ю. М., Главчев М. І., Канищева О. В., Кучук Г. А. Розробка підходу для ранжування академічних установ за показниками наукової діяльності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 1. С. 63–70.
12. Bolognesi M. Reliability in content analysis: The case of semantic feature norms classification / M. Bolognesi, R. Pilgram, R. van den Heerik // *Behavior Research Methods*. – 2017. – Volume 49, Issue 6. – P. 1984-2001.
13. Erlingsson C. A hands-on guide to doing content analysis / C. Erlingsson, P. Brysiewicz // *African Journal of Emergency Medicine*. – 2017. – Volume 7, Issue 3. – P. 93-99.
14. Guedes-Gondim S. M. The use of the qualitative content analysis in psychology: A critical review / S. M. Guedes-Gondim, P. F. Bendassolli // *Psicologia em Estudo*. – 2014. – Vol. 19, № 2. – P. 191-199.
15. Hsieh H.-F. Three Approaches to Qualitative Content Analysis / H.-F. Hsieh, S. E. Shannon // *Qualitative Health Research*. – 2005. – Volume 15, Issue 9. – P. 1277–1288.
16. Zhao J. Facilitating Discourse Analysis with Interactive Visualization / J. Zhao, F. Chevalier, C. Collins, R. Balakrishnan // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 2012. – № 18 (12). – P. 2639-2648.
17. Прокопьева Е.В. О возможностях контент-анализа Я-концепции личности / Е.В. Прокопьева // *Северо-Кавказский психологический вестник*. – 2013. – Том 11, № 1. – С. 22-26.
18. Тарасенко Я.В. Метод семантичного стиснення текстової інформації для протидії комп'ютерній лінгвістичній стегаграфії / Я.В. Тарасенко, О. Б. Півень, І.М. Федотова-Півень // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2018. – №3 (32). – С. 68-78.
19. Литвинов П.П. *Англо-русский и русско-английский синонимический словарь с тематической классификацией. Продвинутый английский через синонимию: Учеб. пособие для самообразования* / П.П. Литвинов. – М.: "Яхонт-А", 2002. – 384 с.

Надійшла (received) 27.09.2019

Прийнята до друку (accepted for publication) 27.11.2019

The content analysis method of the semantic particle in texts with psycholinguistic influence signs

Ya. Tarasenko

Abstract. The purpose of the article is to accelerate the content analysis of the press without using the express approach by adapting the method of semantic content analysis to quantum-semantic psycholinguistic analysis for developing the method of content analysis of the semantic particle. The article deals with solving an actual scientific and practical problem of the press content analysis acceleration without using the express approach. There were solved tasks such as the main components of content-analytic research adapting to the semantic particle analysis on the basis of the synonymous constructions' distribution research due to the summative approach of content-analysis; the semantic particles division by categorical features on the basis of the conventional content analysis approach for the semantics cores distribution by logical levels of the i-concept; determining the semantic particle of the logical level correspondence to the propagandist on the basis of a directed approach in content analysis by investigating the specificity of the synonyms' use. As a research result, the content analysis method of the semantic particle in texts with psycholinguistic influence signs was developed for the first time, based on the complex use of conventional, summative and directed approaches in content analysis by studying the synonymous constructs' thematic differentiation on the basis of textual discourse analysis, which allowed to adapt the semantic analysis methods to quantum-semantic psycholinguistic analysis and, thus, it became possible acceleration the press content analysis. The results can be used to interpret the semantic particle and identify patterns in the worlds of the semantic particle perception.

Keywords: content analysis, semantic particle, core of semantics, categories of psycholinguistic portrait, differentiation of synonyms, psycholinguistic influence.

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПОЯСНЕНЬ ЩОДО РЕКОМЕНДОВАНОГО ПЕРЕЛІКУ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПОРАЛЬНОГО АСПЕКТУ ВИБОРУ КОРИСТУВАЧА

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси формування пояснень щодо рекомендованого переліку товарів та послуг в рекомендаційних системах. **Метою** є розробка моделей пояснення щодо рекомендованого переліку товарів та послуг з урахуванням зміни інтересів користувачів у часів. **Завдання:** обґрунтувати вибір критеріїв для оцінки пояснень; розробити узагальнену модель пояснення, що враховує довіру користувача, а також зміни у продажах товарів та послуг. Використовуваними **підходами** є: підходи до побудови рекомендацій на основі схожості вибору користувачів, а також характеристик об'єктів користувацького вибору. Отримані наступні **результати.** Проведено порівняльний аналіз критеріїв оцінки пояснень та обґрунтовано вибір критеріїв довіри та результативності як ключових для моделювання пояснень з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача. Запропоновано моделі представлення пояснень у вигляді числового показника, значення якого характеризує зміну продажів протягом визначеного періоду часу, а знак пояснення визначає напрямок цих змін – збільшення або зменшення. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано модель пояснення для рекомендацій. Пояснення представлено числовим показником, що враховує зміни продажів на товарів та послуг між інтервалами деталізації часу для визначеного періоду часу. Пояснення враховує зміни продажів вибраного товару на послідовних інтервалах часу для заданого рівня його деталізації, а також зміни продажів для всіх інтервалів у вибраному періоді часу у порівнянні з поточним інтервалом. Запропоноване числове представлення пояснення дає можливість задовільнити одночасно критерії довіри та результативності пояснень: знак показника відповідає критерію довіри, а абсолютне значення з урахуванням знаку дає можливість оцінити результативність роботи рекомендаційної системи. В практичному аспекті представлення пояснення дає можливість обґрунтувати сформовану рекомендацію навіть у випадку шилінг-атак та у ситуації холодного старту рекомендаційної системи, оскільки в якості вхідних даних для його побудови використовується об'єктивна інформація про покупки вибраного товару для заданого періоду часу.

Ключові слова: рекомендаційні системи, системи електронної комерції, пояснення, формування рекомендацій, формування пояснень, критерії оцінки пояснень, темпоральні залежності.

Вступ

Рекомендаційні системи орієнтовані на підтримку вибору користувача систем електронної комерції. Вони формують рекомендований перелік об'єктів (товарів, послуг) на основі інформації про минулий вибір цих користувачів, рейтингів та схожості характеристик цих об'єктів [1]. Такі системи спрощують вибір споживача серед широкого спектру товарів та послуг, що в більшості випадків призводить до збільшення продажів товарів в цілому, а також підвищення продажів цільової групи об'єктів [2]. Тому рекомендаційні системи широко використовуються як у складі систем електронної комерції [3], так і у безпосередньо у якості інтелектуальних порадників [4].

Для розуміння користувачами механізму формування рекомендованого переліку товарів та послуг у таких системах використовують пояснення рекомендацій. Пояснення орієнтовані на зменшення часу, який споживач витрачає на вибір і, як наслідок, на збільшення продажів товарів та послуг.

Роль пояснень є особливо важливою у випадку неповноти або неточності вхідної інформації для побудови рекомендацій. Проблема неповноти та неточності вхідних даних виникає у випадку нових користувачів, а також при штучного спотворення рейтингу товарів.

Рекомендації будуються шляхом порівняння інформації про вибір цільового користувача та інших

користувачів. Вважається, що інформація про покупки та виставлені рейтинги характеризує вибір кожного користувача. Однак у випадку нового користувача виникає ситуація холодного старту, при якій відсутні дані про вибір, що відображає інтереси цього користувача [5], або ж такі дані є застарілими [6, 7].

Штучне спотворення рейтингів товарів та послуг є наслідком атак користувачів (шилінг-атак) з метою збільшення продажів цільової групи об'єктів [8]. Отримані з використанням спотворених даних рекомендації відповідають інтересами злоумисників, а не користувачів рекомендаційною системою [9]. Тому спотворення рекомендацій може знизити довіру користувача до рекомендаційної системи і, як наслідок, зменшити продажі товарів та послуг у відповідній системі електронної комерції.

Використання пояснень дає можливість обґрунтувати для користувача відповідність товарів та послуг із рекомендацій їх інтересам [10] та підвищити його довіру до отриманих рекомендацій.

Сучасні підходи до побудови пояснень базуються на методах пояснення результатів в експертних та прецедентних системах [11].

Для визначення відповідності пояснень вимогам користувача, а також власників рекомендаційної системи, в роботі [12] запропоновано ряд критеріїв оцінки пояснень. Проведена в роботах [13, 14] оцінка пояснень щодо рекомендацій показали збільшення кількості вибраних товарів та послуг після отримання пояснень.

Однак існуючі підходи та критерії побудови пояснень орієнтовані на статичний опис зв'язків між властивостями товарів та послуг, інтересами споживачів, а також рекомендованим переліком об'єктів. Недостатньо уваги приділяється зміні інтересів споживачів з часом. Такі зміни впливають на попит на товари та послуги і тому їх необхідно врахувати в поясненнях.

Таким чином, проблема побудови пояснень з урахуванням темпорального аспекту у потребах та вимогах користувачів є актуальною.

Метою статті є розробка моделей пояснення щодо рекомендованого переліку товарів та послуг з урахуванням зміни інтересів користувачів у часів.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

– обґрунтувати вибір критеріїв для оцінки пояснень з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача;

– розробити узагальнену модель пояснення, що враховує довіру користувача, а також зміни у продажах товарів та послуг.

Вибір критеріїв для оцінки пояснень з урахуванням темпорального аспекту вибору користувачів рекомендаційної системи

Для формування моделі пояснень з урахуванням темпорального аспекту попиту користувача критерії оцінки пояснень доцільно розбити на групи, а потім визначити можливості цих груп щодо врахування змін інтересів користувачів у часі. Порівняльний аналіз розподілених по групам критеріїв оцінки пояснень з урахуванням темпорального аспекту вибору користувачів наведено в табл. 1.

Критерії оцінки пояснень дають можливість оцінити зміну поведінки користувача в результаті використання пояснень, зміни у роботі системи електронної комерції внаслідок застосування пояснень, а також показники зручності використання пояснень з точки зору користувача.

Для оцінки зміни вибору споживачів внаслідок використання пояснень застосовуються показники прозорості, оброблюваності та довіри.

Таблиця 1 – Використання критеріїв оцінки пояснень в рекомендаційних системах з урахуванням темпорального аспекту вибору користувачів

Характеристика групи показників	Критерій	Можливість використання критерію для оцінки змін попиту споживачів
Оцінка змін вибору користувачів	Прозорість	Не враховує темпоральний аспект
	Оброблюваність	Враховує темпоральні зміни, але потребує використання предметно-залежних знань
	Довіра	Може відображати темпоральні зміни, але потребує врахування неявних факторів
Оцінка змін у продажах в результаті використання пояснень	Дієвість (результативність)	Темпоральний аспект може бути врахований на основі аналізу даних про продажі без опитування споживачів
	Переконливість	Темпоральний аспект може бути врахований на основі аналізу даних про продажі
Оцінка зручності використання пояснень з точки зору користувача	Ефективність	Відображає темпоральний аспект, але потребує додаткової інформації щодо дій користувача
	Задоволеність	Зазвичай не враховує темпоральний аспект

Перший показник призначений для оцінки розуміння способу формування рекомендацій. Він, зокрема, встановлює, чи була врахована подібність між предметами або користувачами. Відповідність даному критерію визначається в результаті інтерв'ю з користувачами. Реалізація пояснень, що відповідають цьому критерію, полягає у визначенні послідовності правил «if-then», що приводять користувача до логічного висновку про обґрунтованість вибору запропонованих товарів або послуг.

Даний критерій орієнтований на оцінку статичних характеристик пояснень та не враховує темпоральний аспект.

Другий критерій забезпечує можливість оцінки зміни інтересів споживача в залежності від отриманих пояснень. При використанні даного критерія необхідно реалізувати цикл коригування пояснень. Даний цикл містить у собі такі ключові етапи:

– автоматизоване формування пояснень щодо отриманих рекомендацій;

– реалізація зворотного зв'язку від користувача для перевірки розуміння пояснень; зворотний зв'язок може бути реалізований на основі відслідкову-

вання переходів користувача по сторінкам відповідного сайту;

– уточнення пояснень на основі результатів зворотного зв'язку.

Другий та третій етапи даного циклу повторюються в процесі уточнення вибору користувача.

Даний цикл враховує темпоральний аспект вимог користувача. Однак ітеративна послідовність уточнення пояснень може потребувати експертних знань у даній предметній області. Цей недолік звужує можливості використання критерію оброблюваності для оцінки темпоральних змін у потребах користувача.

Останній критерій призначений для оцінки ступеню довіри споживачів до рекомендованого переліку товарів та послуг. Загальна ідея використання цього критерію полягає в наступному: якщо споживач довіряє отриманим рекомендаціям та поясненням до цих рекомендацій, то він вибирає рекомендовані товари або послуги.

Для оцінки пояснень за даним критерієм зазвичай проводять опитування користувачів рекомендаційної системи.

Даний критерій дає можливість врахувати темпоральний аспект попиту користувачів. Однак при його використанні необхідно враховувати вплив неформальних факторів на зміну потреб користувачів з часом.

Друга група критеріїв призначена для оцінки змін у продажах в результаті використання пояснень щодо рекомендацій.

До складу даної групи входять показники результативності та переконливості.

Перший показник визначає зміну кількості продажів товарів та інтересу до цих товарів в результаті використання пояснень.

Для оцінки відповідності пояснень цьому критерію виконується порівняння суми або кількості покупок визначених товарів до та після використання пояснень. Тобто оцінка пояснень згідно даного критерію використовує неявний, об'єктивний зворотний зв'язок від користувача рекомендаційної системи.

Другий критерій визначає вплив пояснень на вибір цільової групи товарів та послуг. Зазвичай збільшення продажу товарів цільової групи впливає також на результативність пояснень.

Оцінка відповідності отриманих пояснень наведеному критерію базується на порівнянні рейтингів предметів з цільової групи до та після отримання пояснень. Така оцінка базується на неявному зворотному зв'язку від користувача і тому може бути спотворена в результаті шилінг-атак. Вказані атаки використовуються для штучної зміни рейтингів товарів та послуг з метою збільшення продажів цільових товарів та зменшення продажів товарів конкурентів.

Третя група критеріїв визначає зручність використання пояснень з точки зору користувача. До її складу входять критерії ефективності та задоволеності споживача.

Для оцінки відповідності пояснень першому критерію необхідно порівняти кілька циклів отримання рекомендацій для визначеної групи товарів та послуг.

В даному випадку враховується темпоральний аспект, але для з'ясування зв'язку між часом роботи з інтерфейсом та змінами попиту необхідно використовувати додаткові процедури.

Задоволеність користувача є неформальним критерієм і тому визначається в результаті їх опитування. При перевірці відповідності даному критерію темпоральний аспект не враховується.

Таким чином, темпоральний аспект попиту користувача враховується переважно у критеріях першої та другої груп. Ключовими критеріями цих груп, які визначають відношення користувача та переваги від пояснень для систем електронної комерції, є довіра та результативність.

Поєднання цих двох критеріїв при побудові моделі пояснення доцільно здійснити на основі неявного зворотного зв'язку від користувача. Ключова перевага такого зв'язку полягає в тому, що він задається через об'єктивні дані про продажі товарів та послуг. Тобто інтегральна характеристика змін про-

дажів визначених товарів з часом дає можливість об'єктивно відображати результативність пояснень і, тим самим, може забезпечити довіру споживача.

Модель пояснення рекомендацій з урахуванням темпорального аспекту

Пояснення, що відповідає розглянутим критеріям, пропонується формувати з використанням темпоральних правил [15], що враховують зміни продажів товарів у часів. Темпоральні правила типів «Next» та «Future» визначають два варіанти оцінки темпорального аспекту продажів.

Відмінності побудови пояснень на основі цих правил представлені на рис. 1 та 2.

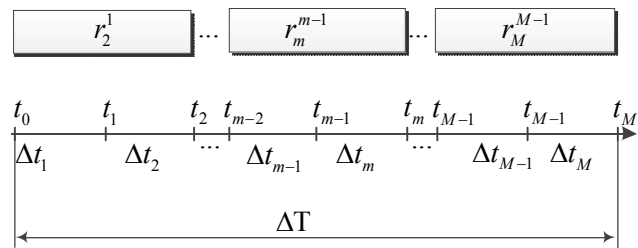


Рис. 1. Опис змін продажів на основі темпоральних правил типу «Future».

В першому випадку пояснення формується на основі суми змін у продажі товарів та послуг для пар послідовних інтервалів часу. Інтервал визначає ступінь деталізації часу (година, день, місяць) і задається в залежності від особливостей продажів товарів та послуг. Наприклад, для товарів повсякденного вжитку інтервал може становити годину або день, сезонних – місяць та більше. Дана оцінка дає усереднене значення змін і може бути корисною у випадку довготривалого росту чи падіння продажів.

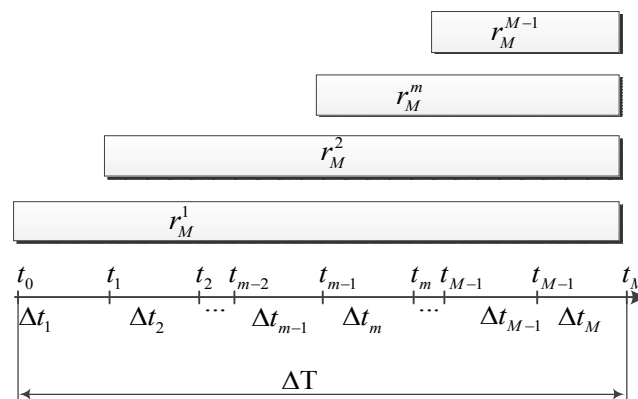


Рис. 2. Опис змін продажів на основі темпоральних правил типу «Future»

В другому випадку пояснення з урахуванням темпорального аспекту виконується шляхом порівняння об'єму продажів за поточний інтервал часу та за всі попередні інтервали (рис. 2). Даний підхід дає можливість врахувати зміни продажів для всіх пар інтервалів часу у визначеному діапазоні ΔT і, тим самим, узагальнити тенденції у змінах попиту спо-

живачів. Темпоральні правила r_m^{m-1} типу «Next» встановлюють зв'язок між послідовними інтервалами часу Δt_{m-1} та Δt_m , що закінчуються в моменти t_{m-1} та t_m відповідно.

Такий зв'язок в даній предметній області визначає зміни (ріст, падіння) продажів вибраного товару на цих інтервалах.

$$r_m^{m-1} = n_m - n_{m-1} \mid \Delta t_m = t_m - t_{m-1}, \quad (1)$$

де n_m , n_{m-1} – кількість проданого певного товару на інтервалах Δt_{m-1} та Δt_m відповідно.

Пояснення з використанням правил типу «Next» визначає нормовану сумарну зміну продажів товару для діапазону часу ΔT :

$$M_{Next} = \frac{\sum_{m=2}^M r_m^{m-1}}{M-1}. \quad (2)$$

Набір темпоральних залежностей типу «Future» має вигляд:

$$R_{Future} = \{r_M^1, r_M^2, \dots, r_M^m, \dots, r_M^{M-1}\} \quad (3)$$

Значення правил типу «Future» обчислюється аналогічно (1), за винятком умови послідовності інтервалів.

Пояснення на основі правил типу «Future» визначає нормовану сумарну зміну (підвищення або зниження) продажів для всіх пар інтервалів з останнім інтервалом часу Δt_M .

$$M_{Future} = \frac{\sum_{m=1}^{M-1} r_M^m}{M}. \quad (4)$$

Таким чином, пояснення у вигляді (2) узагальнює флуктуації попиту на товари та послуги для періоду часу ΔT , а пояснення у вигляді (4) дає можливість порівнювати попит протягом періоду ΔT з попитом у поточний інтервал Δt_M .

Експериментальна перевірка пояснення (4) показала, що нетипові зміни продажів на останньому інтервалі часу Δt_M можуть викривити пояснення. Тобто значення пояснення значною мірою залежить від вибору інтервалу Δt .

Наприклад, продажі могли зростати протягом декількох місяців але бути низькими останні 2-3 дні. В тому випадку, якщо інтервал Δt становить 1 день, то пояснення (4) покаже скорочення попиту, що не відповідає загальній тенденції останніх місяців. В результаті користувач не вибратиме вказаний товар і тим самим спровокує подальше зниження попиту.

Для виправлення цього недоліку доцільно комбінувати пояснення з використанням залежностей «Next» та «Future»:

$$M = kM_{Next} + (k-1)M_{Future}. \quad (5)$$

Значення коефіцієнту k залежить від коливань попиту на об'єкти. Перша складова визначає зріст/падіння попиту на заданому рівні деталізації часу.

У випадку детального представлення часу (година, день) збільшення цієї складової дає можливість нівелювати аномальну зміну попиту на фінальному інтервалі Δt_M у випадку, наприклад, шилінг-атаки.

З іншого боку, при заданні деталізації часу на рівні тиждень, місяць вплив першої складової доцільно зменшити з наступних причин. По-перше, на великих інтервалах часу флуктуації попиту нівелюються згідно (1). По-друге, невідповідність тенденцій змін попиту для останнього інтервалу Δt_m та періоду часу ΔT зменшується для такої деталізації часу.

Слід зазначити, що запропоноване представлення пояснень дає можливість доповнити контекст побудови рекомендацій [16,17] темпоральною складовою.

Висновки

Запропоновано модель пояснення рекомендованого переліку товарів та послуг в рекомендаційній системі. Пояснення представлено числовим показником, що враховує зміни продажів товарів та послуг для визначеного періоду часу, обчислені з використанням темпоральних правил типів «Next» та «Future».

Пояснення з використанням темпоральних правил типу «Next» враховує зміни продажів вибраного товару на послідовних інтервалах часу для заданого рівня його деталізації. Пояснення з використанням правил типу «Future» враховує зміни продажів для всіх інтервалів у вибраному періоді часу у порівнянні з поточним інтервалом. Комбіноване пояснення на основі правил обох типів дає можливість врахувати як поточні зміни продажів, так і збільшення або зменшення продажів протягом заданого періоду часу.

Використання єдиного числового показника у якості пояснення дає можливість задовільнити одночасно критерії довіри та результативності пояснень.

одного боку, отримане пояснення показує нормовані кількісні зміни у продажах конкретного товару за визначений період часу, що дає можливість оцінити результативність використання пояснень у роботі рекомендаційної системи.

З іншого боку, позитивний знак пояснення свідчить про збільшення продажів цільового товару на вибраному інтервалі часу, що має сприяти довірі споживача до отриманої рекомендації.

Перевага практичного використання запропонованого пояснення полягає в тому, що для його побудови використовується об'єктивна інформація про покупки вибраного товару, що дає можливість обґрунтувати сформовану рекомендацію навіть у випадку шилінг-атак та у ситуації холодного старту рекомендаційної системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ricci F., Rokach L., Shapira B. (2015). Recommender systems. Handbook, 1008 p.
2. C. Aggarwal (2017) Recommender Systems: The Textbook, New York: Springer, 498 p.
3. Linden G., Smith B. and York J. (2003), "Amazon.com recommendations: Item-to-item collaborative filtering", Internet Computing, IEEE 7, 1, pp. 76–80.
4. Saga, R., Hayashi, Y., and Tsuji, H. (2008), Hotel Recommender System based on User's Preference Transition, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE/SMC 2008), 2437- 2442.
5. Lika B., Kolomvatsos K., Hadjiefthymiades S. (2014). Facing the cold start problem in recommender systems. Expert Systems with Applications, Vol. 41(4), pp. 2065-2073.
6. Bernardi L. et al. (2015) The Continuous cold start problem in e-commerce recommender systems. The Computing Research Repository (CoRR) in arXiv, Vol. 1508.01177, pp. 1-6.
7. Chalvi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. (2019). Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommendation system. EUREKA: Physics and Engineering, 4, 34-40 DOI:10.21303/2461-4262.2019.00952.
8. I. Shilling "Attack detection for recommender systems based on credibility of group users and rating time series", <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196533> [Published: May 9, 2018].
9. Chala O., Novikova L., Chernyshova L. (2019). Method for detecting shilling attacks in e-commerce systems using weighted temporal rules. EUREKA: Physics and Engineering, 5, 29-36.
10. Cleger-Tamayo, J. M. Fernandez-Luna, J. F Huete (2012) "Explaining neighborhood-based recommendations", in the 35th International ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval, ACM, 2012, pp. 1063–1064.
11. Cunningham, P., Doyle, D., Loughrey, J. (2003) An Evaluation of the Usefulness of Case-Based Reasoning Explanation. In: Case-Based Reasoning Research and Development: Proceedings ICCBR. Number 2689 in LNAI, Trondheim, Springer, pp. 122–130.
12. N Tintarev, J Masthoff (2007). A Survey of Explanations in Recommender Systems. In G Uchyigit (ed), Workshop on Recommender Systems and Intelligent User Interfaces associated with ICDE'07, pp. 801-810.
13. Tintarev N., Masthoff J. (2010) Designing and evaluating explanations for recommender systems, in Ricci, F. Rokach, L. Shapira, B. and Kantor, P. (Eds.), Recommender systems handbook, Springer, Dordrecht, 479–510.
14. N. Tintarev, J. Masthoff "Evaluating the effectiveness of explanations for recommender systems", in User Modeling and User-Adapted Interaction, 2012, № 22(4), pp.399–439.
15. Levykin V., Chala O. (2018). Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/3(95), 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142664.
16. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. (2018). Моделювання контексту в рекомендаційних системах. Проблеми інформаційних технологій, 1(023), 21-26.
17. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. (2018). Інтеграція локальних контекстів споживачів в рекомендаційних системах на основі відношень еквівалентності, схожості та сумісності. Process mining Materials of the VII International Scientific Conference «Information-Control System and Technologies», 142-144.

Received (Надійшла) 30.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.12.2019

**Modeling explanations for the recommended list of items
based on the temporal dimension of user choice**

S. Chalvi, V. Leshchynskyi, I. Leshchynska

Abstract. The **subject matter** of the article is the process of generating explanations for the recommended list of goods and services in recommendation systems. The **goal** is to develop models for explaining the recommended list of goods and services, considering the changing interests of users over time. **Tasks:** justify the selection of criteria for evaluating the explanations; to develop a generalized explanation model that considers the trust of the user, as well as changes in sales of goods and services. The **approaches** used are: approaches to constructing recommendations based on the similarity of user choices, as well as characteristics of user choice objects. The following **results** are obtained. A comparative analysis of the criteria for evaluating the explanations is carried out and the choice of criteria for trust and performance as key for modeling the explanations, considering the temporal aspect of the user's choice, is justified. Models for the presentation of explanations in the form of a numerical indicator, the value of which characterizes changes in sales over a given period of time, and the sign of explanation determines the direction of these changes - increase or decrease. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows. An explanation model for recommendations is proposed. The explanation is represented by a numeric indicator that considers changes in sales of goods and services between the intervals of time detail for a given period of time. The explanation considers the change in sales of the selected product at successive time intervals for a given level of detail, as well as changes in sales for all intervals in the selected time period compared to the current interval. The proposed numerical representation of the explanation makes it possible to simultaneously satisfy the criteria of trust and the effectiveness of the explanations: the sign of the indicator meets the criterion of trust, and the value gives the opportunity to evaluate the performance of the recommendation system. In practical terms, the presented explanation makes it possible to substantiate the recommendation even in the case of shilling attacks and in the situation of a cold start of the recommendation system, since objective information on purchases of the selected product for a given period of time is used as input data.

Keywords: recommender systems, e-commerce systems, explanation, formation of recommendations, formation of explanations, criteria for evaluating explanations, temporal dependencies.

В. А. Глива¹, О. В. Панова², О. М. Тихенко¹, Л. О. Левченко³, В. П. Колумбет³

¹ Національний авіаційний університет, Київ, Україна

² Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

³ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНИХ ЕКРАНІВ НА ОСНОВІ АМОРФНИХ СПЛАВІВ

Анотація. Сучасні методи екранування допускають використання найбільш придатних металевих матеріалів для одночасного вирішення декількох задач для захисту працюючих та електромагнітної сумісності технічного обладнання. Одним з таких ефективних металевих матеріалів вважають аморфні магнітом'які сплави. Предмет дослідження даної роботи – визначення захисних властивостей аморфного магнітом'якого сплаву при різних значеннях частотних та амплітудних характеристик в залежності від зміни товщини стрічки матеріалу. Досліджено магнітні властивості пермалою від різної частоти екранованого поля з різним відсотковим вмістом нікелю та різною товщиною захисного металевого матеріалу; залежності коефіцієнта екранування магнітом'яких аморфних сплавів від індукції зовнішнього магнітного поля; коефіцієнти екранування аморфного магнітом'якого сплаву різної товщини та різного відсоткового вмісту кобальту від змінних значень амплітуди; магнітооброблений стан та вихідний стан (недоліки та переваги для конкретних умов використання при захисті та економічних вимог); залежності магнітної проникності магнітом'якого аморфного сплаву від різних значень частоти та амплітуди. Мета роботи - визначення коефіцієнтів екранування захисних аморфних магнітом'яких сплавів від амплітудно-частотних характеристик екранованого магнітного поля та обґрунтування ефективності використання таких матеріалів та надання конкретних рекомендацій щодо захисту від електромагнітних полів та випромінювань працюючих людей та сумісності електричного та електронного технічного обладнання. Розроблено захисні властивості магнітних екранів на основі аморфних сплавів у різних амплітудно-частотних діапазонах. Запропоновано раціональні обґрунтовані рекомендації щодо вибору матеріалу для забезпечення найбільш придатних значень коефіцієнтів екранування. Доведено експериментально що аморфні магнітом'які сплави мають сприятливі коефіцієнти екранування від частоти екранованого поля, що підвищує ефективність захисту від магнітних полів працюючих людей та спрощує, з економічної точки зору, обрання матеріалу на конкретному виробництві. Отримані графічні залежності надають можливість обирати необхідний захисний металевий матеріал та автоматизувати процеси розроблення засобів оптимального екранування магнітних полів. Багатосерійність досліджень та легка керуваність властивостей матеріалів з різним вмістом металевих субстанцій, різної товщини стрічки матеріалу, тощо надає змогу змінювати загальні захисті властивості металевого сплаву (в залежності від поставленої умови на виробництві).

Ключові слова: аморфні сплави, електромагнітні поля, коефіцієнт екранування; амплітудно-частотні залежності; захист працюючих; електромагнітна сумісність.

Вступ

Серед металевих матеріалів для екранування електричних полів найбільш ефективними й перспективними є аморфні магнітом'які сплави.

Їх перевагами є великі магнітні проникності, малі товщини за високих механічних властивостей та стабільність, на відміну від пермалоїв, електрофізичних показників під час експлуатації. При цьому магнітом'які аморфні сплави у достатній кількості виробляються в Україні.

Недоліком аморфних сплавів, як і в усіх металевих матеріалів, є великі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль, що у багатьох випадках є небажаним через погіршення електромагнітної обстановки у напрямках відбиття.

Але цей показник не завжди критичний, особливо за потреби екранування локалізованих у просторі джерел магнітних полів. При цьому він придатний для одночасного вирішення задач електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання.

Втім, дослідження щодо залежностей коефіцієнтів екранування цих матеріалів від амплітуд та частот екранованих полів мають фрагментарний характер, а похибки вимірювань великі через використання застарілого обладнання.

Тому актуальною є задача максимально коректного вимірювання коефіцієнтів екранування найбільш поширених аморфних магнітом'яких сплавів у залежності від умов їх застосування та надання рекомендацій щодо їх найбільш ефективного використання у галузях охорони праці та електромагнітної сумісності технічних засобів.

Аморфні металеві сплави розроблялися для їх застосування у якості магнітопроводів, мікрозондів тощо, як альтернатива пермалоюм, які мають суттєві недоліки – залежність магнітних властивостей від механічних впливів. До того ж розміри виробів з аморфних сплавів набагато менші за вироби з електротехнічних сталей та пермалоїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість публікацій щодо властивостей таких сплавів мають рекламний характер і стосуються переваг

конкретних виробів з них. У роботах [1, 2] було показано, що аморфні магнітом'які сплави можна застосовувати для захисту працюючих. При цьому надано коефіцієнти екранування тільки для деяких частот. Тому, як анонсовано у статтях, дані мають оціночний характер.

У подальшому аморфні сплави використовувалися у прикладних розробках для захисту електрозварювальників та енергетиків, а коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти визначалися за принципом їх достатності для визначення умов [3, 4].

У подальших роботах [5, 6] було надано деякі дані щодо залежностей коефіцієнтів екранування аморфних сплавів на основі кобальту від напруженостей та частот магнітних полів, які екрануються. Але, як зазначено у статтях, у якості вимірювачів використовувалося обладнання власної розробки, тому похибки вимірювань склали до 3 дБ. Це неприйнятне у сучасних умовах, коли електромагнітна безпека та електромагнітна сумісність технологічного обладнання є двоєдиною задачею. Тому потребують ретельних досліджень на сучасному обладнанні залежності захисних властивостей аморфних магнітом'яких сплавів від умов їх застосування.

Постановка завдання. Мета роботи – дослідження залежностей коефіцієнтів екранування аморфних магнітом'яких сплавів від амплітудних та частотних характеристик екранованого магнітного поля та надання рекомендацій щодо їх ефективного використання.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що електричне поле легко екранується будь-яким металевим матеріалом, що впливає з його фундаментальних властивостей.

В той же час екранування магнітного поля у багатьох випадках є складною задачею і залежить від багатьох технічних характеристик зовнішнього поля, розташування екрану (в залежності від поставленої задачі), різноманітних властивостей екрану (загальних параметрів, складу, товщини тощо), а також – від поставленої загальної мети дослідження та характеристик оточуючого середовища (включаючи інші технічні засоби).

Тому дослідження щодо екрануючих властивостей матеріалів, принаймні у низькочастотній області доцільно виконувати щодо магнітного поля.

Визначення захисних властивостей екранів здійснювалося за методикою [7]. Такий метод полягає у реєстрації спектрів магнітних полів, визначенні критичних амплітуд та їх зниженні у екранованій зоні з урахуванням загальних технічних характеристик та інших критеріїв використання електромагнітних екранів [8, 9]. Оскільки екранування електромагнітних полів металевими екранами ефективне, дослідження обраних сплавів виконувалося для наднизьких та низьких частот магнітного поля, які впливають на роботу спроможність обладнання.

Головні параметри та складові дослідження:

- використовувався сплав на основі кобальту, який виробляється в Україні (ТОВ «Лилта»);

- екрани були суцільними (замкненими), виготовленими плетінням стандартних металевих стрічок товщиною 50 мкм, шириною 0,05 м;

- реєстрація напруженості магнітного поля здійснювалася за допомогою каліброваного аналізатора спектра SPECTRAN NF5035;

- похибка вимірювань не перевищувала 1 %.

Результати вимірювань захисних властивостей (коефіцієнтів екранування) наведено на рис. 1 та 2.

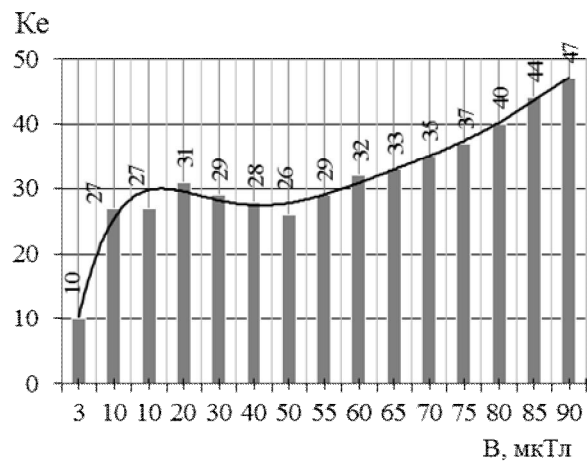


Рис. 1. Залежність коефіцієнта екранування магнітом'яких аморфних сплавів від індукції зовнішнього магнітного поля частотою 50 Гц та 150 Гц (вміст кобальту 70 %, товщина екрана 50 мкм)

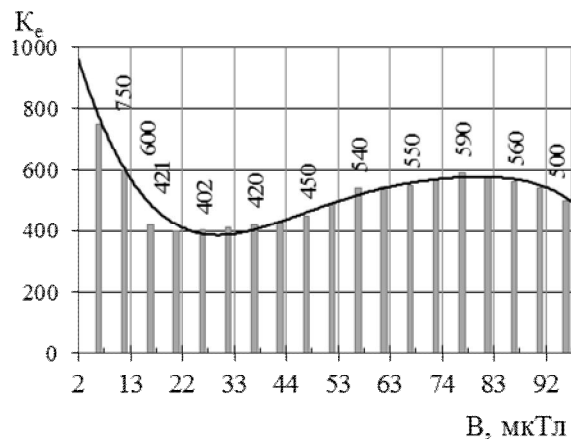


Рис. 2. Залежність коефіцієнта екранування магнітом'яких аморфних сплавів від індукції зовнішнього магнітного поля частотою 10 кГц (вміст кобальту 70 %, товщина екрана 50 мкм)

На основі отриманих залежностей можна зробити висновок про суттєву залежність коефіцієнта екранування від амплітудних значень екранованого поля, що потребує врахування у працехоронній практиці.

Відомо, що захисні властивості для магнітного поля залежать від магнітної проникності. При використанні аморфних сплавів для підвищення їх магнітних властивостей виконуються термічна та термомагнітна обробка. Термічна обробка виконувалася при температурі 350 °С упродовж однієї години. Термомагнітна обробка здійснювалася за температури 300 °С у постійному магнітному полі напруженістю 1000 А/м. Зміни магнітних властивостей сплавів наведено на рис. 3.

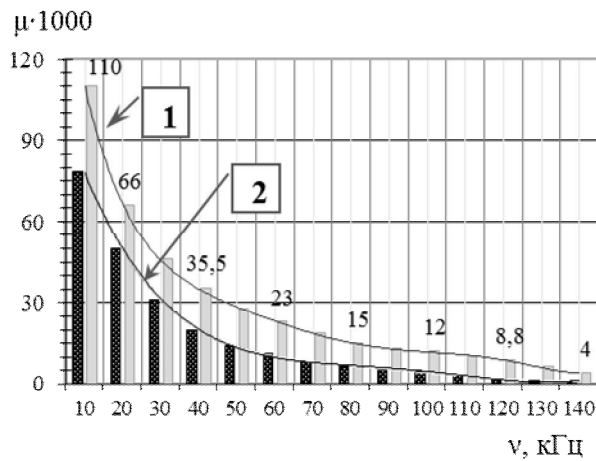


Рис. 3. Залежність магнітної проникності магнітом'якого аморфного сплаву від частоти (вміст кобальту 70 %): 1 – термооброблений стан, 2 – вихідний стан

Але при цьому спостерігається дуже критична залежність ефективної магнітної проникності від амплітуди екранованого магнітного поля (рис. 4).

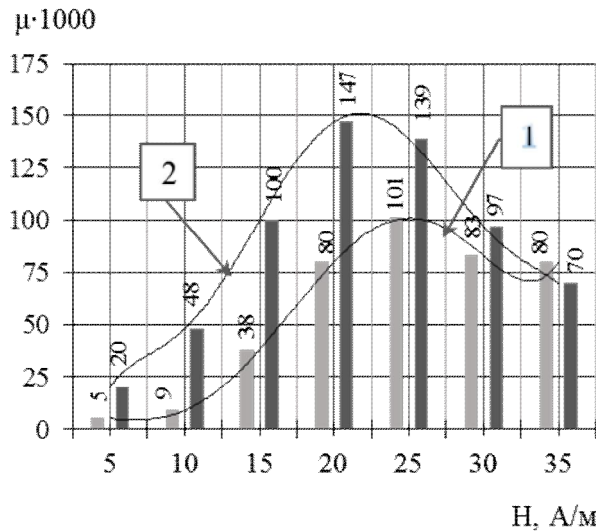


Рис. 4. Залежність магнітної проникності магнітом'якого аморфного сплаву від амплітуди магнітного поля частотою 10 кГц (вміст кобальту 70 %): 1 – термооброблений стан, 2 – вихідний стан

Було досліджено залежність коефіцієнтів екранування від амплітудних значень магнітного поля (рис. 5 та 6).

Доцільно порівняти магнітні властивості розглянутого аморфного сплаву з показниками більш дешевих та поширених пермалоїв (рис. 7).

Наведені дані дозволяють однозначно обрати матеріал для забезпечення потрібних коефіцієнтів екранування магнітного поля і раціоналізувати процес нормалізації електромагнітної обстановки у виробничому середовищі та забезпечити електромагнітну сумісність електронного обладнання на принципах розумної достатності. При цьому слід враховувати, що термічна обробка знижує гнучкість аморфних сплавів.

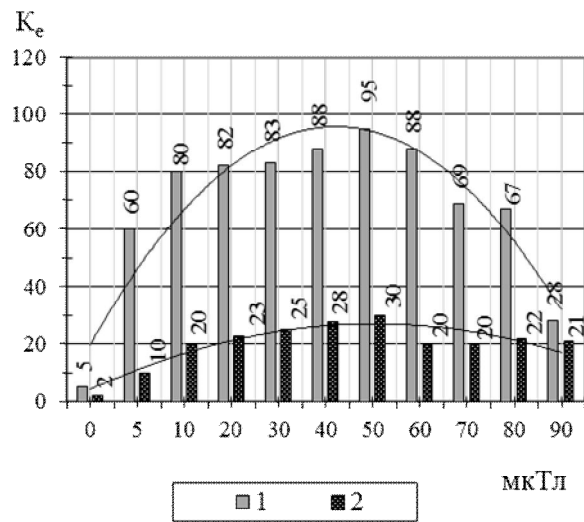


Рис. 5. Залежність захисних властивостей аморфного магнітом'якого сплаву від зміни амплітуди (вміст кобальту 70 %, товщина стрічки 50 мкм) на частоті 50-150 Гц; 1- магнітооброблений стан, 2- вихідний стан

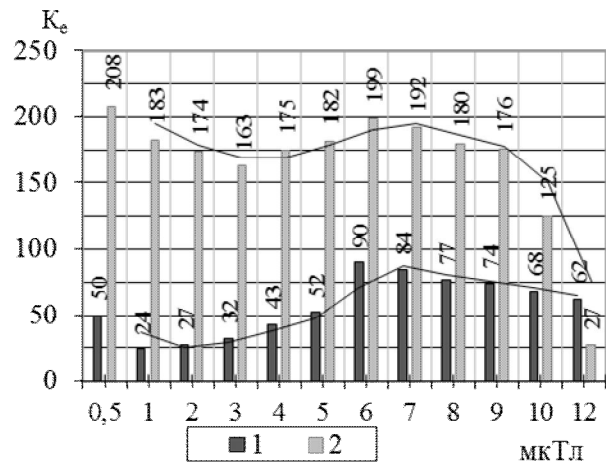


Рис. 6. Залежність захисних властивостей аморфного магнітом'якого сплаву від зміни амплітуди (вміст кобальту 70 %, товщина стрічки 50 мкм) на частоті 10 кГц; 1- магнітооброблений стан, 2- вихідний стан

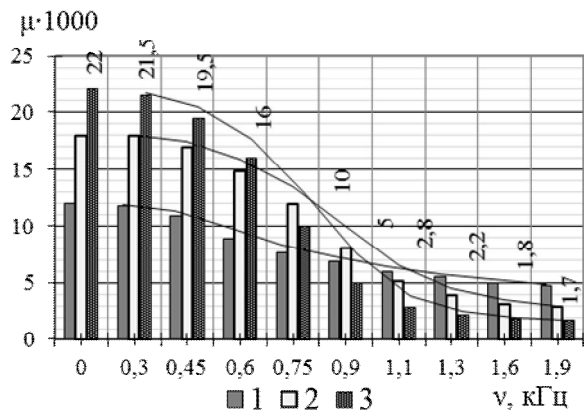


Рис. 7. Залежність магнітних властивостей пермалою від частоти екранованого поля (товщина листа 0,3 мм, 1, 2, 3 – вміст нікелю 79 %, 68 %, 80 % відповідно)

Аналіз результатів свідчить, що навіть за товщиною, більшою на порядок пермалої поступаються аморфним сплавам. Наведені дані однозначно вказують, що пермалої ефективні тільки на наднизьких і низьких частотах. При цьому їх магнітні властивості дуже різко знижуються зі збільшенням частоти магнітного поля.

Висновки

1. В усіх металевих матеріалів аморфні сплави найбільш ефективні матеріали для екранування магнітних полів.

2. Аморфні магнітом'які сплави мають більш «гладенькі» залежності коефіцієнтів екранування від частоти екранованого магнітного поля. Це спрощує

процес обрання матеріалу у залежності від частотних та амплітудних характеристик магнітного поля.

3. Порівняння захисних властивостей висококобальтового сплаву у стані заводської поставки, термічною та термомагнітною обробкою свідчить про керованість цих властивостей матеріалу одного хімічного складу.

4. Отримані дані дозволяють однозначно обирати стан матеріалу у залежності від умов його застосування та забезпечувати як потрібні рівні захисту працюючих, так і ступені електромагнітної сумісності електронного технологічного обладнання. Це також дає змогу, за використання наведеного графічного матеріалу автоматизувати процеси розроблення засобів оптимального екранування магнітних полів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Levchenko O.G., Levchuk V.K. Safe level of electromagnetic field intensity in resistance. *The Paton Welding Journal*, 2008. № 5. P. 38–47.
2. Запорожець О.І., Лук'янчиков А.В., Глива В.А. Оцінка захисних властивостей магнітом'яких матеріалів *Проблеми охорони праці в Україні*, 2007. Вип. 14. С. 35-42.
3. Фартух електрозварника: пат. Україна, МПК G12B17/02; заявл.18.03.1010; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
4. Екрануючий комплект: пат. України 90892, МПК G12B 17/00; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.
5. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. канд. техн. наук: 05.26.01 / Київ, 2014. 151 с.
6. Глива В.А. Забезпечення стабільності функціонування технологічного обладнання в умовах підвищення електромагнітного навантаження на виробниче середовище. *Проблеми охорони праці*. 2015. Вип.30. С. 32–36.
7. Спосіб визначення захисних властивостей електромагнітного екрану: пат. України 14984, МПК E21D 11/38, G12B 17/00; заяв. 27.12.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.
8. Панова О.В. Загальні критерії застосування електромагнітних екранів для забезпечення електромагнітної безпеки та сумісності технічного обладнання. *Наука та інновації. «Вісті Донецького гірничого інституту»*, Вип.2(43), 2018, с.11. Режим доступу: www.science.donntu.edu.ua
9. Панова О.В. Екранування електромагнітних полів для електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності обладнання. *Управління розвитком складних систем: Зб. наук. праць*. 2015. Вип. № 22. С. 207–213. Режим доступу: <http://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-22/37.pdf>

Received (Надійшла) 29.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.12.2019

Amplitude-frequency dependence research for protective properties of amorphous alloy based magnetic screening

V. Glyva, O. Panova, O. Tykhenko, L. Levchenko, V. Kolumbet

Abstract. Modern shielding methods offer using metals most suitable for solving several problems simultaneously: protecting workers and electromagnetic compatibility of technical equipment. Amorphous soft magnetic alloys are considered as metallic materials with such properties. The goal of this work is determining protective properties of an amorphous soft magnetic alloy at various frequency and amplitude characteristics, depending on thickness changes of the material tape - magnetic properties of permalloy, depending on various frequencies of the screened field with protective metal material's various percentages of nickel and different values of thickness. Examined the dependence of magnetically soft amorphous alloys' screening coefficient to external magnetic field's induction; the screening coefficients of an amorphous soft magnetic alloy with various percentages of cobalt and different thicknesses to variable amplitude values; the magnetized and initial state (disadvantages and advantages for specific conditions of protective usage considering economic requirements); the magnetically soft amorphous alloy's magnetic permeability dependences for various values of frequency and amplitude. Objective determining the shielding coefficients of protective amorphous soft magnetic alloys for amplitude-frequency characteristics of the shielded magnetic field; substantiation of effectiveness for using such materials and provision of specific recommendations for protection against electromagnetic fields and radiation for working people and compatibility of electrical and electro-technical equipment. Protective properties of magnetic screens based on amorphous alloys in various amplitude-frequency ranges are developed. Unambiguous rational substantiated recommendations for choosing materials to ensure the most suitable values of screening coefficients in this situation are proposed. It has been proven experimentally that amorphous soft magnetic alloys have favorable shielding coefficients, depending on the shielded field's frequency, which increases the efficiency for protecting workers against magnetic fields and simplifies, from an economic point of view, the choice of material in a particular production. The results of graphical dependencies provide the opportunity to choose the necessary protective metal material and automate the development of means of optimal shielding from man-made magnetic fields. Series of studies and easily controlling material properties with different contents of metal substance, different thicknesses of material tape, etc. makes it possible to change the general protective properties of such a metal alloy (depending on the tasks in production).

Keywords: amorphous alloys, electromagnetic fields; shielding factor; amplitude-frequency dependencies; protection of workers; electromagnetic compatibility.

О. Л. Кузнєцов¹, А. М. Артеменко², В. М. Петрушенко³, А. Д. Карлов¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Генеральний штаб Збройних Сил України, Київ, Україна

³ В/ч А2183, Первомайськ, Україна

ОЦІНЮВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЦІЛІ КОГЕРЕНТНО- ІМПУЛЬСНИМИ РЛС ЗА МЕЖАМИ ДАЛЬНОСТІ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ

Анотація. У статті оцінюються можливі значення складових середньоквадратичної помилки вимірювання радіальної швидкості цілі, які виникають внаслідок флуктуацій фази радіосигналу за межами дальності прямої видимості РЛС. Обґрунтована доцільність використання когерентної пачки радіоімпульсів для забезпечення необхідної дальності виявлення із заданими показниками якості. Розгляд проводиться для моделі сигналу з випадковою амплітудою та початковою фазою. Вважається, що фазові флуктуації розподілені за нормальним законом з нульовим середнім, а їхня кореляція убуває зі збільшенням інтервалу між радіоімпульсами пачки за знакозмінним законом. Результати вказують на те, що внаслідок фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки, середньоквадратична помилка вимірювання радіальної швидкості цілі здатна перевершувати значення, які визначаються тактичними вимогами до когерентно-імпульсних РЛС. Проведений чисельний аналіз дозволяє визначати ступінь погіршення якості часо-частотної обробки пачки радіоімпульсів в когерентно-імпульсних РЛС та оцінювати ступінь зниження ефективності подальшої вторинної обробки радіолокаційної інформації.

Ключові слова: дальність прямої видимості, радіолокаційне спостереження, радіальна швидкість, когерентно-імпульсна РЛС, пачка радіоімпульсів, фазові флуктуації.

Вступ

Постановка проблеми. Забезпечення необхідної дальності радіолокаційного спостереження малопомітних, малорозмірних та маневруючих цілей пов'язано з отриманням якомога більшого відношення сигнал-шум на виході пристрою узгодженої обробки прийнятого сигналу.

При радіолокаційному спостереженні таких цілей, використання особливостей поширення радіохвиль у тропосферному радіохвильоводі дозволяє суттєво збільшити дальність дії РЛС.

Здатність сучасних аеродинамічних цілей в ході виконання завдань за призначенням до здійснення раптових маневрів обумовлює необхідність оцінювання їх радіальної швидкості з максимально високою точністю. Для рішення цієї задачі в когерентно-імпульсних РЛС в якості зондувального сигналу використовується когерентна пачка радіоімпульсів.

Реальні умови поширення та відбиття даного радіолокаційного сигналу за межами дальності прямої видимості суттєво обмежують його часову когерентність та якість часо-частотної обробки.

Такими умовами можна вважати: вплив атмосферних неоднорідностей, доплерівський шум цілі та відбиття радіохвиль від земної поверхні зі складним рельєфом місцевості або схвильованої поверхні моря. Данні умови призводять до виникнення флуктуацій фаз радіоімпульсів прийнятої пачки, які знижують точність вимірювання її частоти і як слід радіальної швидкості цілі.

Вказане свідчить про необхідність оцінювання впливу даних факторів на якість вимірювання коор-

динат та параметрів руху цілей, здатних до раптового маневру за радіальною швидкістю, зокрема бойових вертольотів.

Організація противертольотної боротьби найбільш ефективна у разі знищення вертольотів на якомога більших дальностях до об'єктів. При цьому найбільш ефективними засобами знищення вертольотів є винищувальна авіація, застосування якої вимагає певного часу її наведення. Для ефективного рішення цієї задачі необхідно мати інформацію про швидкість польоту цілі. Враховуючи, що для сучасних вертольотів швидкість польоту складає 240...320 км/год, дальність їх виявлення повинна перевершувати 100 км.

До сучасних когерентно-імпульсних РЛС висуваються достатньо суворі вимоги щодо забезпечення заданих точнісних характеристик. Так, в РЛС, які здійснюють траєкторну обробку радіолокаційної інформації, помилка вимірювання радіальної швидкості цілі не повинна перевершувати 1 м/с.

Таким чином, необхідно проаналізувати значення складових помилки вимірювання радіальної швидкості цілі та оцінити ступінь внеску окремих факторів у зниження якості часо-частотної обробки пачки радіоімпульсів у когерентно-імпульсних РЛС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вдосконалення та розвиток сучасних аеродинамічних об'єктів радіолокаційного спостереження обумовлюють підвищення вимог до засобів їх виявлення та супроводження.

В сучасних когерентно-імпульсних РЛС реалізовані алгоритми цифрового когерентного накопичення прийнятого пачкового радіосигналу. Тому,

має практичну користь оцінювання можливих помилок вимірювання радіальної швидкості цілі в залежності від статистичних характеристик фазових флукуцій радіоімпульсів прийнятої пачки.

Радіолокаційному спостереженню цілей та вимірюванню їх координат й параметрів руху в складних умовах присвячена значна кількість робіт.

Флукуції фази, що виникають внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та особливості застосування радіотехнічних систем в цих умовах описані в роботах [1-5]. Окрім цього, фазові викривлення прийнятого сигналу, які обумовлені складною формою цілі та її здатністю до виконання раптового маневру, викликають блукання її радіолокаційного центру та, як слід, появу швидкісних шумів цілі [1, 6, 7, 8]. У випадку багатотрасового поширення радіолокаційного сигналу при радіолокаційному спостереженні цілей, що рухаються під малими кутами місця, також з'являються його додаткові фазові викривлення, що розглядаються у роботах [4, 6, 7, 9, 10].

Аналіз особливостей локації вертольотів на малих і гранично малих висотах показав, що використання радіолокаційних станцій розвідки в умовах пересіченої місцевості є малоефективним. Разом з цим у радіолокаційній практиці за рахунок тропосферного радіохвильоводу спостерігалось явище розповсюдження радіохвиль над морською поверхнею на дальності, яка перевищує дальність прямої видимості (ПВ).

З урахуванням методики, викладеної у [11], результати, які наведені в роботі [12, 13], вказують на те, що дальність виявлення вертольоту за межами дальності прямої видимості в умовах його локації над морем може бути збільшена в 7...10 разів. Однак, при цьому суттєвий вплив здійснюють флукуції фази прийнятого радіосигналу.

Проблеми вимірювання дальності та радіальної швидкості цілей в даних умовах розглядалися в роботах [14, 15]. Однак наведені результати були отримані для випадку використання в РЛС поодинокого радіосигналу. Забезпечення необхідної дальності виявлення та точності вимірювання радіальної швидкості цілі пов'язано з використанням в якості зондувального сигналу РЛС когерентної пачки радіоімпульсів.

У [16-22] наведена методика розрахунку помилки вимірювання частоти пачки, що виникає внаслідок впливу фазових флукуцій її радіоімпульсів.

Припущення щодо статистичних характеристик відбитих сигналів підтверджені результатами експериментального дослідження, які висвітлені в [23].

Тому, актуальною задачею є пошук шляхів оцінювання ступеня погіршення точності вимірювання радіальної швидкості складних маневруючих цілей за межами прямої видимості РЛС та аналіз впливу цього погіршення на їхню подальшу трасову обробку.

Метою статті є розрахунок складових помилок вимірювання радіальної швидкості цілі та аналіз їхнього внеску в результуючу помилку для типових параметрів когерентно-імпульсних РЛС.

Основний матеріал

Забезпечення стійкості радіолокаційного спостереження складних маневруючих цілей безпосередньо пов'язане з максимізацією відношення сигнал-шум, яке визначає необхідну дальності дії РЛС, якість радіолокаційного виявлення та точність вимірювання їхніх координат. Це досягається когерентним накопиченням пачки прийнятих радіоімпульсів.

Для моделі сигналу з випадковими амплітудою і початковою фазою умовна ймовірність правильного виявлення описується виразом [24]

$$D = F^{-\left(1+q^2/2\right)} \quad (1)$$

і залежить тільки умовної ймовірності хибної тривоги F та від відношення сигнал-шум за потужністю q^2 (параметра виявлення).

Таким чином, для підвищення умовної ймовірності правильного виявлення необхідно збільшувати відношення сигнал-шум, що може бути забезпечено використанням когерентної пачки з якомога більшою кількістю радіоімпульсів.

Вважається, що прийнята реалізація є сумою відбитого від цілі корисного радіосигналу та внутрішнього шуму приймального пристрою

$$y(t, \Omega) = x(t, \Omega) + n(t), \quad (2)$$

де $y(t, \Omega)$ - реалізація прийнятого коливання; $x(t, \Omega)$ - реалізація корисного сигналу; $n(t)$ - реалізація внутрішнього гаусівського шуму; Ω - циклічна частота Доплера прийнятого радіосигналу.

Як корисний сигнал розглядається пачка, яка має n радіоімпульсів з випадковою амплітудою та початковою фазою. До фаз радіоімпульсів пачки додаються флукуційні складові φ_i ($i = 1, 2 \dots n$), які обумовлені наведеними вище умовами його поширення та відбиття

$$\dot{X}(t, \Omega) = b \sum_{i=1}^n \dot{X}_i(t, \Omega) \exp[j(\beta + \varphi_i)], \quad (3)$$

де $\dot{X}_i(t, \Omega)$ - комплексна амплітуда i -го радіоімпульсу; b - випадкова амплітуда радіосигналу, яка розподілена за законом Релея; β - випадкова початкова фаза радіосигналу, яка розподілена за рівномірним законом; φ_i - флукуційна складова початкової фази i -го радіоімпульсу; i - номер радіоімпульсу, який відлічується від початку пачки; n - число радіоімпульсів в пачці.

На рис. 1 надані графіки залежності умовної ймовірності правильного виявлення (1) від кількості радіоімпульсів, що накопичуються когерентно, в процесі обробки прийнятого сигналу.

Результати отримані при $q^2 = 100$ для випадків: $F = 10^{-4}$ (крива 1), $F = 10^{-6}$ (крива 2), $F = 10^{-8}$ (крива 3), $F = 10^{-10}$ (крива 4).

Дані значення характеризують якість радіолокаційного виявлення РЛС різного призначення, як оглядових РЛС, так й РЛС супроводження.

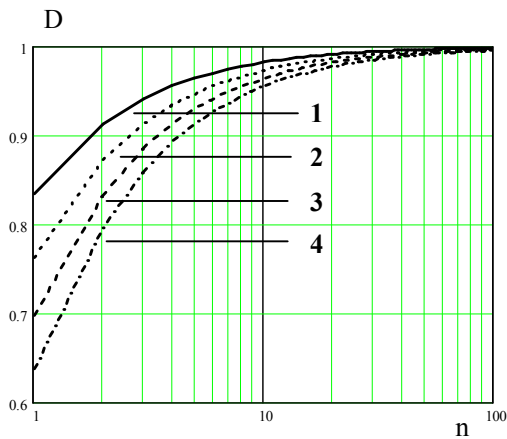


Рис. 1. Залежність умовної ймовірності правильного виявлення від кількості радіоімпульсів

Отримані залежності свідчать про те, що когерентне накопичення радіоімпульсів прийнятої пачки здатне значно підвищити якість радіолокаційного виявлення. При цьому, найбільший ефект спостерігається при переході від обробки одного радіоімпульсу до когерентної обробки 10 радіоімпульсів. Підвищення умовної ймовірності правильного виявлення D в залежності від умовної ймовірності хибної тривоги $F = 10^{-4} \dots 10^{-10}$ складає 15...30 відсотків. Перехід від когерентного накопичення 10 радіоімпульсів до когерентного накопичення 100 радіоімпульсів викликає збільшення D лише на 1,6...4 відсотка.

Вказане свідчить про те, що при рішенні задачі якісного радіолокаційного спостереження необхідно забезпечити синфазне складання 10..30 прийнятих радіоімпульсів.

Внаслідок наявності ефекту тропосферного радіохвилеводу можливо виявлення цілей на дальностях, які значно перевищують дальність ПВ. Це підтверджуються результатами експерименту, наведеними у [12]. При його проведенні, у якості радіолокаційного вимірювача було використано розташовану на узбережжі Азовського моря когерентно-імпульсну РЛС 35Д6Д.

Дальність ПВ об'єктів $D_{пв}$, яка вимірюється у кілометрах, визначається як:

$$D_{пв} = \sqrt{2a_e} (\sqrt{h_{РЛС}} + \sqrt{h_A}), \quad (4)$$

де $a_e = \frac{a_3}{1 + a_3 g_N \cdot 10^{-6}}$ - еквівалентний радіус Землі/

З аналізу рівняння (4) випливає, що єдиною неконтрольованою змінною є вертикальний градієнт індексу заломлення повітря g_N . В даному випадку значення g_N склало -0,19 Н од./м, що майже у п'ять разів відрізняється від нормального значення

Однак, на дальності більш ніж дальність ПВ було зареєстровано факт зростання помилок виміру координат повітряних цілей за рахунок впливу корельованих флуктуацій фази радіолокаційного сигналу.

Відповідно до результатів експерименту, в умовах аномальної рефракції при поширенні елект-

ромагнітних хвиль над морем амплітуда та початкова фаза радіолокаційних сигналів розподілені за нормальним законом. При цьому, нормована кореляційна функція фази відбитого сигналу має осцилюючий характер.

Для пачки радіоімпульсів з прямокутною обвідною та парною кількістю радіоімпульсів, дисперсія помилки вимірювання параметра Ω за наявності лише внутрішніх шумів приймального пристрою оцінюється згідно виразу [16]

$$\frac{1}{\sigma_{\Omega_{ш}}^2} = \frac{q^2(4m^2 - 1)}{12} T^2 \quad (5)$$

та має вид

$$\sigma_{\Omega_{ш}}^2 = \frac{12}{q^2(4m^2 - 1)T^2}, \quad (6)$$

де T - період слідування радіоімпульсів пачки; m - число пар радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки.

Наявність флуктуацій фази радіосигналу викликає розширення піка тіла невизначеності за часочастотними параметрами та його відхилення від центру, що призводить до погіршення точності вимірювання радіальної швидкості цілі.

Якщо, фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки описуються осцилюючою кореляційною функцією, то дисперсія помилки вимірювання параметра Ω за наявності лише фазових флуктуацій оцінюється згідно виразу, отриманого в роботі [16]

$$\sigma_{\Omega_{фл}}^2 = \frac{18\sigma_{\phi}^2}{m^2(4m^2 - 1)^2 T^2} \times$$

$$\times \left[\sum_{j=1}^m (2j-1)^2 (1 - \exp(-\frac{T}{\tau}(2j-1)) \cos((2j-1)\gamma T)) + 2 \times \right.$$

$$\times \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-\frac{T}{\tau}l) \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1)(2j+2l-1) \times$$

$$\left. \times (\cos(j\gamma T) - \exp(-\frac{T}{\tau}(2j-1)) \cos((2j+l-1)\gamma T)) \right], \quad (7)$$

де σ_{ϕ}^2 - дисперсія фазових флуктуацій; τ - інтервал кореляції фазових флуктуацій; γ - частота осциляцій коефіцієнта кореляції фази.

Відповідні складові середньоквадратичної помилки (СКП) вимірювання радіальної швидкості цілі можуть бути розраховані згідно виразів:

$$\sigma_{v_{ш}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_{\Omega_{ш}}, \quad (8)$$

$$\sigma_{v_{фл}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_{\Omega_{фл}}, \quad (9)$$

де λ - довжина хвилі РЛС.

Для когерентно-імпульсних РЛС керування повітряним рухом та Повітряних Сил оглядового типу сантиметрового діапазону довжин хвиль частота

повторення радіоімпульсів пачки може знаходитись в діапазоні 680...1700 Гц.

Принципова відмінність РЛС супроводження полягає у тому, що цей клас РЛС призначається для наведення засобів ураження (ракет) на ціль. Особливістю РЛС супроводження є наявність систем автосупроводження, зокрема за дальністю та радіальною швидкістю [25].

Має практичну користь отримати можливі значення складових СКП вимірювання радіальної швидкості цілі при відношенні сигнал-шум за потужністю $q^2 = 1000$, для випадків когерентного накопичення короткої $n = 8$, середньої $n = 16$ та тривалої $n = 32$ пачок радіоімпульсів для РЛС даних типів.

За допомогою виразів (6) та (8) можна розрахувати складову СКП вимірювання радіальної швидкості цілі, обумовлену внутрішніми шумами приймального пристрою $\sigma_{\text{вш}}$ для пачок з $n = 8, 16$ та 32 .

Для випадку поширення радіохвиль у випадково-неоднорідному середовищі, в роботі [1, 2] надані величини дисперсії фазових флуктуацій радіосигналу σ_{ϕ}^2 , який пройшов крізь обурену тропосферу Землі. Інтервал кореляції фазових флуктуацій може складати $\tau = 0,1 \dots 1$ с.

В РЛС оглядового типу на дальностях виявлення цілей понад 200 км, неоднорідності тропосфери розміром 100 м здатні викликати флуктуації фази з дисперсією $\sigma_{\phi}^2 = 1,74 \text{ рад}^2$ при $\lambda = 0,1$ м.

Для РЛС супроводження на дальностях виявлення цілей 50...150 км, неоднорідності тропосфери розміром 100 м здатні викликати флуктуації фази з дисперсією $\sigma_{\phi}^2 = 4,8 \dots 9,7 \text{ рад}^2$ при $\lambda = 3 \dots 5$ см.

Для наведених даних, за допомогою виразів (7) та (9) можна розрахувати складову СКП вимірювання радіальної швидкості цілі, обумовлену фазовими флуктуаціями радіоімпульсів прийнятої пачки $\sigma_{\text{вфл}}$ для $n = 8, 16$ та 32 .

Результати розрахунків складових СКП вимірювання радіальної швидкості цілі для РЛС оглядового типу наведені в табл. 1.

Результати розрахунків складових СКП вимірювання радіальної швидкості цілі для РЛС супро-

водження наведені в табл. 2. Отримані результати свідчать про те, що значення складових СКП вимірювання радіальної швидкості цілі, обумовлені фазовими флуктуаціями радіоімпульсів прийнятої пачки здатні в декілька разів перевершувати складові, обумовлені впливом внутрішніх шумів приймального пристрою РЛС.

Таблиця 1 – Складові СКП вимірювання радіальної швидкості цілі для РЛС оглядового типу, м/с

n	$\sigma_{\text{вш}}$	$\sigma_{\text{вфл}}$
8	0,08...0,18	0,5...0,76
16	0,04...0,09	0,36...0,54
32	0,02...0,05	0,26...0,38

Таблиця 2 – Складові СКП вимірювання радіальної швидкості цілі для РЛС супроводження, м/с

n	$\sigma_{\text{вш}}$	$\sigma_{\text{вфл}}$
8	0,66	1,85...6,9
16	0,33	1,3...4,82
32	0,16	0,91...3,4

Окрім впливу неоднорідностей тропосфери, вплив доплеровського шуму цілі та багатотрасовості поширення радіосигналу обумовлює додаткове збільшення флуктуаційної складової СКП вимірювання радіальної швидкості цілі до декілька одиниць м/с і більше. Причому, в значно більшому ступені фазові викривлення радіолокаційного сигналу здійснюють вплив на роботу РЛС супроводження, викликаючи небезпеку зриву цілі з авто супроводження за дальністю та радіальною швидкістю.

Висновки

Проведене оцінювання свідчить про необхідність використання спеціальних методів зниження впливу вказаних факторів при радіолокаційному вимірюванні радіальної швидкості цілі як в межах дальності прямої видимості РЛС, так й поза цими межами.

Отримані результати дозволяють визначати ступінь погіршення якості часо-частотної обробки пачки радіоімпульсів в когерентно-імпульсних РЛС та оцінювати ступінь зниження ефективності подальшої вторинної обробки радіолокаційної інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / под. ред. Я.Д. Ширмана. – М: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с.
2. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин – М: Сов. радио, 1970. – 383 с.
3. Карлов В.Д. Влияние среды распространения радиоволн на приморском направлении при измерении угловых координат радиолокационных целей / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, В.В. Челпанов, К.П. Квиткин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – № 3 (25). – С. 51-53.
4. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк – М: Радио и связь, 1988. – 223 с.
5. Петрушенко М.М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометеорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах / М.М. Петрушенко // Системи управління навігації та зв'язку. – 2009. – № 2 (10). – С. 54-57.
6. Карлов В.Д. Обнаружение аэродинамических целей в условиях шумовых и пассивных помех с широким доплеровским спектром / В.Д. Карлов, И.Г. Леонов, А.Е. Присяжный, О.Я. Луковский // Системи обробки інформації. – 2006. – № 9(58). – С. 34-36.
7. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника / Пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. – М: Сов. радио, 1976, Т 1. – 456с.

8. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей/ – М: Радио и связь, 1982. – 232 с.
9. Котов А.Ф. Влияние отражений от подстилающей поверхности на процесс локации объектов // Теория и практика систем синхронизации / Московский институт радиотехники электроники и автоматики. – 1992. – С.4-8.
10. Карлов В.Д. Влияние неоднородностей рельефа позиции радиолокационной станции на эффективность подавления внешней помехи при локации надводных целей / В.Д. Карлов, Н.Н. Минервин, Н.Н. Петрушенко, Е.В. Лукашук // Системи управління навігації та зв'язку. – 2008. – № 4 (8). – С. 34-36.
11. Белевщук Я.О. Розробка методики оцінки радіолокаційних характеристик вертолітної техніки Повітряних Сил Збройних Сил України / Я.О. Белевщук, М.М. Бречка, В.О. Василець, О.І. Сухаревський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2011. – № 1 (5) – С. 83-88.
12. Карлов В.Д. Особливості локації вертольотів в умовах поширення радіохвиль над морем / В.Д. Карлов, А.М. Артеменко, О.В. Струцінський, І.М. Пічугін // Збірник наукових праць ХУПС. – 2017. – № 4 (53). – С. 93-96.
13. Карлов В.Д. Особливості локації вертольотів здійснюючих політ над морем на малих висотах / В.Д. Карлов, О.М. Бесова, І.М. Пічугін, О.В. Струцінський // Новітні технології-для захисту повітряного простору : зб. тез доповідей Чотирнадцятої наукової конференції ХНУПС. 11 – 12 квітня 2018 р. – Харків, 2018. – С. 444.
14. Карлов В.Д. До питання про вимірювання дальності маловисотної цілі при її радіолокації в межах тропосферного хвилеводу над морем / В.Д. Карлов, Д.Б. Кучер, О.В. Струцінський, О.В. Лукашук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 3 (24). – С. 98-101.
15. Карлов В.Д. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем / В.Д. Карлов, А.П. Кондратенко, А.К. Шейгас, Ю.Б. Ситник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1 (14). – С. 115-117.
16. Минервин Н.Н. Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения цели, обусловленные неучетом флюктуаций фаз импульсов пачки / Н.Н. Минервин, А.Л. Кузнецов // АКТТ. – 2001. – № 22. – С. 288-294.
17. Кучук Г. А. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов беспроводных сетей / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
18. Карлов В.Д. Помилка вимірювання радіальної швидкості цілі внаслідок впливу флюктуацій початкових фаз радіоімпульсів пачки / В.Д. Карлов, О.Л. Кузнецов, А.М. Артеменко, А.Д. Карлов // Системи управління навігації та зв'язку – 2019. – № 1 (53) – С. 61-65.
19. Кучук Г.А. Синтез стратифікованої інформаційної структури інтеграційної компоненти гетерогенної складової Єдиної АСУ Збройними Силами України / Г.А. Кучук, О.П. Давікоза // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 3. – С. 154-158.
20. V. Karlov Evaluation of the accuracy of measuring the radial velocity of a target with an exponential and alternating decrease in phase correlation of the burst radio signal / V. Karlov, O. Kuznietsov, A. Artemenko, A. Karlov // Сучасні інформаційні системи – 2019. – Том 3 № 1 – С. 71-75.
21. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
22. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
23. Карлов В.Д. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. / В.Д. Карлов, А.О. Родюков, І.М. Пічугін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – Вип. 4 (21). – С. 71-74.
24. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос – М: Радио и связь, 1981. – 416 с.
25. Радиоэлектронные системы / Ю.М. Седишев, В.І. Карпенко, Д.В. Атаманський та ін. – Х: ХУПС, 2010. – 418 с.

Received (Надійшла) 20.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.12.2019

Evaluation of the possibilities of providing the necessary accuracy of the radial velocity measuring of a target by coherent-pulse radars outside the line of sight

O. Kuznietsov, A.. Artemenko, V. Petrusenko, A.. Karlov

Abstract. The urgent task is to find ways to evaluate the degree of deterioration in the accuracy of radial velocity measurement of complex maneuvering targets beyond the radar's line of sight and to analyze the impact of this deterioration on their subsequent track processing. The purpose of the article is to calculate the components of the error measurement of the radial velocity of the target and to analyze their contribution to the resulting error for typical parameters of coherent pulse radar. The article estimates the possible values of the components of the mean-square error of measuring the radial velocity of the target which appear as a result of fluctuations of the phase of the radio signal outside the radar line of sight. The expediency of using a coherent burst of radio pulses to provide the necessary detection range with specified quality indicators is substantiated. Consideration is carried out for a model of a signal with a random amplitude and an initial phase. It is assumed that phase fluctuations are distributed according to the normal law with zero mean, and their correlation decreases with an increase in the interval between the radio bursts of the packet alternating. The results show that due to the phase fluctuations of the radio pulses of the received pack, the mean-square measuring error of the target radial velocity can exceed the values determined by the tactical requirements for coherent-pulse radars. The performed numerical analysis allows to determine the degree of reduction of the quality of the radio pulses burst time-frequency processing in coherent-pulse radars and evaluates the degree of reduction of the effectiveness of the further secondary processing of the radar information.

Keywords: radar line of sight, radar surveillance, radial velocity, coherent-pulse radar, burst of radio pulses, phase fluctuations.

О.А. Серков¹, К. А. Трубочанінова², Б. О. Лазуренко¹

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

² Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

МЕТОД ОЦІНКИ ІМОВІРНОСТІ БІТОВОЇ ПОХИБКИ В СИСТЕМАХ НАДШИРОКОСМУГОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Анотація. Предметом вивчення є процеси забезпечення безпроводової завадостійкої передачі дискретної інформації на ґрунті надширокосмугових сигналів з високою інформаційною ємністю. **Мета** – розробка аналітичних співвідношень для розрахунку імовірності біткової похибки в залежності від співвідношення сигнал/шум в каналі з адитивною гаусовою завадою. **Задача** – забезпечення усталеної та надійної роботи НШС системи зв'язку в умовах завад. Використані **методи**: методи аналітичного, імітаційного моделювання та цифрового кодування сигналів. Отримані наступні **результати**. На ґрунті аналізу функціонування НШС системи радіозв'язку виявлено, що зміни енергії та автокореляційної функції прийнятих сигналів в потоці інформаційних бітів є причиною виникнення внутрішньо системних завад, які викликають збільшення біткової похибки та деградацію імовірнісних характеристик системи зв'язку. Отримані аналітичні співвідношення дозволяють обчислити залежності імовірності похибки на біт в залежності від співвідношення сигнал/шум в каналі чи при різноманітних значеннях бази сигналу. Виявлено існування локальних екстремумів для характеристик біткової похибки при оптимальних значеннях бази НШС сигналів, коли імовірність біткової похибки стає найменшою. Це дозволяє обґрунтовано обирати найкращі значення бази НШС сигналу та мати високу завадостійкість та надійність системи передачі цифрової інформації. **Висновки.** Використання технології НШС сигналів дозволяє здійснити безпроводову приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання на швидкості 1-2 Мб/с з імовірністю похибки на біт менш, ніж 10^{-3} . Причому, за умов використання великої бази сигналу $B = 500 - 1000$ отримуємо імовірність біткової похибки на рівні $10^{-4} - 10^{-6}$ при суттєво менших одиниці відношення сигнал/шум. Таким чином система НШС радіозв'язку з кодовою модуляцією в передавачі та спектральною обробкою в приймачі має високу завадостійкість, що дозволяє здійснювати надійну передачу цифрової інформації в умовах завад.

Ключові слова: передача інформації; завадостійкість; прихованість; спектральна обробка; кореляція.

Вступ

Середовище розповсюдження є фізичним шляхом між передавачем та приймачем для безпроводових каналів зв'язку. Якість передачі сигналів з високою інформаційною ємністю обумовлюють характеристики каналу передачі інформації, серед яких найбільш суттєвими є ширина смуги частот випромінювання та рівень зовнішніх та внутрішньо системних завад. Найбільш оптимальним та розповсюдженим для безпроводових систем радіозв'язку є діапазон частот від 1 до 10 ГГц. [1]. Визначені межі діапазону смуги частот обумовлені тим, що на частотах менше, ніж 1 ГГц мають місце значні завади з боку промислових та побутових електронних пристроїв. У той же час на частотах вище 10 ГГц виникає значне поглинання сигналу середовищем розповсюдження за рахунок виникнення резонансів на краплинах дощу, туману чи пилу.

Технологія надширокосмугового (НШС) зв'язку полягає у передачі малопотужних кодованих імпульсів в дуже широкій смузі частот без несучої частоти. При цьому випромінюють не гармонічне коливання, а надкороткий імпульс, тривалість якого знаходиться у межах 0,2 – 2,0 нс, а період імпульсної послідовності складає 10 – 100 нс. Зазвичай, такі сигнали мають форму ідеалізованих гаусівських моноциклів, основна частина спектру якого знаходиться у смузі частот від 1 до 10 ГГц. Так, наприклад, використання у якості кодуємого імпульсу моноциклу Гауса тривалістю Δt від 2,0 до 0,1 нс, ширина смуги частот складе відповідно від 500 МГц до 10 ГГц, а спектр сигналу буде при цьому займає всю смугу частот від 0 до $\Delta F \approx 1/\Delta t$ [2-4].

Аналіз технічних рішень

Застосування технології надширокосмугового зв'язку здійснюють шляхом попереднього перетворення відносно вузькосмугових інформаційних сигналів з ефективною смугою спектра Δf на ширококугові з шириною спектру ΔF , за умов збереження його загальної енергії E . При цьому спектральна щільність енергії каналного сигналу упереджено зменшують у $\Delta F/\Delta f$ рази, яка у цьому випадку складатиме $E/\Delta F$. Таким чином база каналного сигналу зростає у $\Delta F/\Delta f$ разів. Слід також зазначити, що базою надкороткого імпульсу є добуток тривалості сигналу на ширину його спектру. Найбільш простим та зручним методом розширення бази сигналу є пряме розширення спектру частот. При цьому, чим вище застосована частота, тим вища потенційна швидкість передачі інформації.

Телекомунікаційні системи з розширенням спектру характеризують висока швидкість передачі інформації, високий рівень електромагнітної сумісності та завадостійкості по відношенню до зовнішніх завад та шкідливої інтерференції за умов багатопроменевого розповсюдження сигналів [4-6]. В системах радіозв'язку з розширенням спектру здійснюють оптимальну обробку прийнятих сигналів із використанням когерентного опорного сигналу, який передається по каналу зв'язку одночасно з модульованим інформаційним сигналом. В системах надширокосмугового радіозв'язку із розподіленням та затримкою інформаційних сигналів (time delay diversity) за малий час визначають автокореляційну функцію прийнятих сигналів у вигляді суми опорного та інформаційного сигналів [7]. Енергія НШС

сигналі, прийнятих протягом тривалості кожного біту інформації змінюється випадковим чином та не зберігається постійною в потоці бітів. Крім того, суттєвий вплив на імовірнісні характеристики системи надширокопосмугового радіозв'язку мають зовнішні завади та флуктуація енергії прийнятих НШС сигналів. Таким чином, нагальною задачею є розробка рекомендацій щодо підвищення рівня завадостійкості та прихованості каналу НШС радіозв'язку з адитивним гаусовим білим шумом.

Метод оцінки імовірності бітової похибки в системах надширокопосмугового зв'язку

Внесення цифрової інформації в передавачі здійснюють з розширенням спектру за рахунок кодової спектральної модуляції НШС сигналів. До безпроводового каналу зв'язку одночасно поступають як опорний сигнал $n(t)$, так і інформативні сигнали $n(t - T_1)$ чи $n(t - T_0)$ із затримкою на малі часові інтервали T_1 чи T_0 згідно потоку інформаційних бітів – одиниць чи нуля. В приймачі визначають автокореляційний відгук прийнятих сигналів з кодовою спектральною модуляцією та за часовими зсувами кореляційних піків здійснюють однозначне відтворення переданих бітів інформації. Розширення спектра переданого сигналу у декілька разів у порівнянні з спектром інформаційного повідомлення необхідно, але недостатньо для створення системи зв'язку на ґрунті технології НШС сигналів. В приймаче слід виконати когерентний стиск НШС сигналів у полосу частот переданої інформації.

В системі за результатами подвійної спектральної обробки обчислюється комплексна кореляційна функція прийнятого сигналу.

$$R_Z(\tau) = 2\pi k^2 \times [2R_n(\tau) + R_n(\tau - T_{1,0}) + R_n(\tau + T_{1,0})] + R_s(\tau), \quad (1)$$

яка має інформаційний пік із зсувом на час T_1 чи T_0 згідно потоку бітів одиниця чи нуль, а також кореляційну функцію адитивних гаусових завад $R_s(\tau)$ в каналі зв'язку. Детектор максимального рівня обчислює для співвідношення (1) модулі кореляційних піків $R_s(\tau; T_{1,0})$ при $\tau = T_1$ та $\tau = T_0$, різницю яких порівнюють із нульовим порогом $U_n=0$ для прийняття рішення про визначення переданого біту [7-11].

Позначимо модулі кореляційних піків через r_0 і r_1 та запишемо їх для гіпотез H_0 та H_1 .

Так при гіпотезі H_0 :

$$\begin{aligned} r_0(T_0) &= |R_z(T_0; T_0)|, \\ r_1(T_0) &= |R_z(T_1; T_0)|. \end{aligned} \quad (2)$$

При гіпотезі H_1 :

$$\begin{aligned} r_0(T_1) &= |R_z(T_0; T_1)|, \\ r_1(T_1) &= |R_z(T_1; T_1)|. \end{aligned} \quad (3)$$

В демодуляторі здійснюють порівняння цих модулів один з одним. При цьому спочатку визна-

чають $r_0 > r_1$ і $r_0 < r_1$ чи їх різницю $r_0 - r_1$ та порівнюють її з нульовим порогом. Для визначення імовірності похибки при передачі двійкового символу необхідно отримати значення сумісних двомірних щільностей імовірності випадкових амплітуд r_0 і r_1 комплексних кореляційних функцій для двох гіпотез H_0 та H_1 . Позначаємо їх через $W(r_0, r_1 / H_0)$ та $W(r_0, r_1 / H_1)$. Тоді умовні імовірності похибки при передачі бітів нуль і одиниця та застосування вирішуючого правила на ґрунті порівняння модулів матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} P(r_0 < r_1 / H_0) &= \int_0^\infty \int_0^\infty W(r_0, r_1 / H_0) dr_1 dr_0, \\ P(r_0 > r_1 / H_1) &= \int_0^\infty \int_0^{r_0} W(r_0, r_1 / H_1) dr_1 dr_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Зважаючи на те, що НШС інформаційний сигнал $n(t)$ і адитивні завади $s(t)$ є стаціонарними гаусовими випадковими процесами, отримуємо остаточні співвідношення для умовних імовірностей похибки (4) у вигляді:

$$\begin{aligned} P(r_0 < r_1 / H_0) &= \\ &= \int_0^\infty y \exp\left\{-\frac{1}{2}(y^2 + \alpha_{00}^2)\right\} \times \\ &\times I_0(\alpha_{00}, y) Q(\alpha_{00}, y \gamma_0) dy, \end{aligned} \quad (5)$$

де $I_0(x)$ – функція Бесселя нульового порядку від уявного аргументу,

$$\begin{aligned} \alpha_{kv} &= \frac{m_k(T_v)}{\sqrt{N_{\text{кк}}(T_v)}}, \\ y_v &= \sqrt{\frac{N_{00}(T_v)}{N_{11}(T_v)}}, \\ k &= 0, 1; \quad v = 0, 1, \dots \end{aligned} \quad (6)$$

При отриманні співвідношення (5) використана формула Q- функції Маркума:

$$Q(\alpha, \beta) = \int_\beta^\infty x \exp\left[-\frac{1}{2}(x^2 + \alpha^2)\right] I_0(\alpha x) dx. \quad (7)$$

До складу співвідношення (6) входять складові $m_k(T_v)$ та $N_{11}(T_v)$, які є середніми значеннями і дисперсіями для оцінки кореляційної функції $R_z(\tau_1; T_{1,0})$ при $k = 0, 1; v = 0, 1$. За умов рівності априорних імовірностей гіпотез $P(H_0) = P(H_1) = 0,5$, повна імовірність похибки визначається у вигляді:

$$\begin{aligned} P_0 &= 0,5 \times \\ &\times [P(r_0 < r_1 / H_0) + P(r_0 > r_1 / H_1)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Співвідношення 5, 6, 7 дозволяють розрахувати повну імовірність похибки (8) при передачі бітів в

каналі з адитивними гаусовими завадами для безпровідної системи надширококутвого зв'язку з кодовою спектральною модуляцією в передавачі.

Розраховані залежності імовірностей похибок від співвідношення потужностей корисного сигналу та завади в каналі зв'язку наведені на рис. 1.

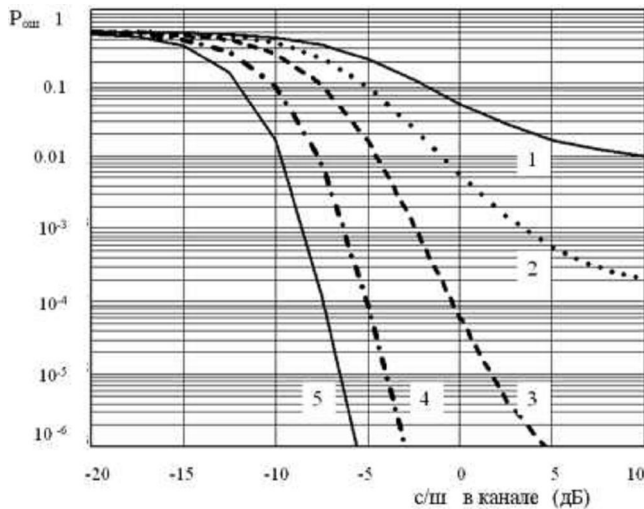


Рис. 1. Залежності імовірності похибки P від співвідношення сигнал/шум при різній базі сигналу: (1 — $V=50$; 2 — $V=100$; 3 — $V=200$; 4 — $V=500$; 5 — $V=1000$).

Співвідношення потужностей корисного сигналу та завади в каналі зв'язку за різною базою НШС сигналу $V = \Delta f \cdot T_b = \Delta f / C_b$, визначається наступним співвідношенням:

$$q = 2\sigma_n^2 / \sigma_s^2. \quad (9)$$

У цьому співвідношенні σ_n^2 та σ_s^2 є дисперсії інформаційних сигналів $n(t)$ та адитивних гаусових завад $s(t)$, T_b — тривалість біту, $C_b = 1/T_b$ — швидкість передачі бітів.

Таким чином завадостійкість, електромагнітна сумісність та прихованість безпроводової системи передачі цифрової інформації визначають залежності імовірності бітової похибки від співвідношення сигнал/шум в каналі зв'язку (рис. 1).

За умов фіксованої смуги частот, наприклад, $\Delta f = 1000$ МГц наведені залежності являють собою вірогідність передачі інформації в системі НШС зв'язку із швидкістю передачі бітів $C_b = 10$ Mb/s, 5 Mb/s, 2 Mb/s та 1 Mb/s, у відповідності з базою сигналу $V = 50, 100, 200, 500, 1000$. Із збільшенням швидкості передачі бітів C_b , за умов фіксованої смуги частот Δf , спостерігається зсув вправо залежностей так, що імовірність похибки зростає при зменшенні значень співвідношення сигнал/шум в каналі зв'язку.

При великій швидкості передачі бітів C_b залежності 1 і 2 зазнають обмеження знизу так, що імовірність бітової похибки є не меншою, ніж 10^{-2} при швидкості передачі $C_b = 20$ Mb/s та не нижче величини 10^{-4} при швидкості передачі $C_b = 10$ Mb/s. У той же час залежності 3, 4, 5 зазнають обмеження на більш низькому рівні для імовірності похибки під

час передачі бітів з меншою швидкістю $C_b = 5$ Mb/s, 2 Mb/s та 1 Mb/s.

Аналіз

Аналіз BER — характеристик доводить, що імовірність бітової похибки не прагне наблизитися до нуля навіть за відсутності завад в каналі. Оцінка параметра прихованості для цифрової системи зв'язку здійснюється за параметром q , який визначає відношення потужності інформаційного сигналу до потужності завад в каналі при заданій імовірності бітової похибки.

Імовірність бітової похибки залежить від бази сигналу.

Так для сигналів з великою базою, наприклад, 500, 1000, імовірність бітової похибки стає нижчою за 10^{-5} - 10^{-6} навіть при негативному значенні параметра q в інтервалі значень -3...-6 дБ.

Таким чином, при великій базі сигналу $V > 300$, коли інтенсивність прийнятих сигналів знаходиться нижче рівня завад, включаючи власні шуми приймача, надійна передача інформації здійснюється з імовірністю похибки менш ніж 10^{-6} . Це характеризує високу завадостійкість та прихованість НШС системи зв'язку.

Висновки

Використання технології НШС сигналів дозволяє здійснити безпроводову приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання на швидкості 1-2 Мб/с з імовірністю похибки на біт менш, ніж 10^{-5} .

Показано, що випадкові зміни енергії та автокореляційної функції прийнятих НШС сигналів в потоці бітів є причиною виникнення внутрішньо системних завад. У свою чергу це викликає збільшення бітової похибки та деградацію імовірнісних характеристик системи зв'язку.

Отримані аналітичні співвідношення дозволяють обчислити залежності імовірності похибки на біт в залежності від співвідношення сигнал/шум в каналі чи співвідношення сигнал/шум на біт при різноманітних значеннях бази сигналу.

Розраховані характеристики бітової похибки свідчать про високий рівень прихованості та електромагнітної сумісності надширококуткової системи зв'язку при передачі дискретних повідомлень в каналі зв'язку з адитивним гаусовим білим шумом. Причому, за умов використання великої бази сигналу $V = 500 - 1000$ отримуємо імовірність бітової похибки на рівні $10^{-4} - 10^{-6}$ при суттєво менших одиницях відношення сигнал/шум.

Виявлено існування локальних екстремумів для характеристик бітової похибки при оптимальних значеннях бази НШС сигналів, коли імовірність бітової похибки стає найменшою. Отримані результати дозволяють обґрунтовано обирати найкращі значення бази НШС сигналу та оцінювати співвідношення сигнал/шум на біт при заданих імовірностях бітової похибки.

Таким чином, система НШС радіозв'язку з кодовою модуляцією в передавачі та спектральною

обробкою в приймачі має високу завадостійкість, що дозволяє здійснювати надійну передачу цифрової інформації в умовах завад.

Вдячність

Цю роботу було частково профінансовано Європейським Союзом у контексті проекту «dComFra – Digital competence framework for Ukrainian teachers

and other citizens» (Project Number: 598236-EPP-1-2018-1-LT-EPPKA2-CBHE-SP) за програмою ERASMUS+.

Підтримка Європейською Комісією створення цієї роботи не означає повного схвалення її змісту, який віддзеркалює лише погляди авторів. Комісія не може нести відповідальності за будь-яке використання інформації, яку розміщено в цій роботі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Harmuth H.F. (1981). *Non sinusoidal Waves for Radar and Radio Communication*, Academic Press. New York, London, Toronto, Sydney, San Francisco. 376 p.
2. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Kravets V. (2018) "Method of coding information distributed by wireless communication lines under conditions of interference" // *Advanced Information Systems*. - 2018. – Vol.2, No.2. pp. 145-148, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.25>
3. Serkov, A. (2017). Noise-like signals in wireless information transmission systems / A. Serkov, V. Breslavets, M. Tolkachov, G. Churyumov, Issam Saad // *Advanced Information Systems*. – 2017. – Vol. 1, №2 – P. 33 – 39, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.06>.
4. Serkov, O. A. (2019). On the issue of solving the problem of electromagnetic compatibility of the wireless telecommunication Systems / O. A. Serkov, G. I. Churyumov // *Applied Radio Electronics*. – Kharkiv: KHNURE, 2017. – Vol. 16 № 3, 4. – P. 117-121.
5. Serkov, A. (2019). Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev and W. Nannan // *10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Leeds, United Kingdom, 2019, pp. 25-28. doi: 10.1109/DESSERT.2019.8770039 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8770039&isnumber=8770005>
6. O.A. Serkov, V.S. Breslavets, M.Yu. Tolkachov, G.I. Churyumov. (2018). "Method of Generation the Wideband Impulse Signals and Antenna for his Realization". Patent application of Ukraine for utility model number a 2018 03104; appl. 26.03.2018, unpublished.
7. Serkov A., Trubchaninova K., Mezitis M. (2019) "Method of wireless transmission of digital information on the basis of ultra-wide signals" // *Advanced Information Systems*. - 2019. – Vol.3, No.4. pp. 33-38, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.04>.
8. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. (1986). Теория передачи сигналов, - М.: Радио и связь, 1986. – 304 С.
9. Калинин В.И., Радченко Д.Е., Черепенин В.А. Внутрисистемные помехи при передаче информации на основе СШП шумовых сигналов // 24-я Межд. Крымская конф. (СiMiCo'2014). Материалы конф. Севастополь: Вебер, 2014, Т.1, с.221-222.
10. Калинин В.И., Радченко Д.Е., Черепенин В.А. Вероятностные характеристики цифрового канала передачи информации на основе непрерывных шумовых сигналов со спектральной модуляцией // *Радиотехника*, 2015, №8, С. 84-94.
11. Serkov O., Breslavets V., Tolkachov M., Churyumov G. (2018) "The Wideband Pulsed Antenna and its Application" [9th Inter. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018)], September 4 – 7, Odessa Ukraine, ISBN: 978-1-5386-2467-8, IEEE Catalog Number: CFP18587. – P. 340-343.

Received (Надійшла) 27.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.12.2019

Metod for estimating the probability of bit error in ultra-wideband communication systems

O. Serkov, K. Trubchaninova, B. Lazurenko

Abstract. The subject of study is the process of providing wireless noise-resistant transmission of discrete information that are based ultra-wideband signals with high capacity for information transmission. Goal of the study – development of analytical expressions for calculating the probability of bit-errors depending on the signal-to-noise ratio in the channel with additive Gauss interference. The objective is to ensure stable and reliable performance of UWB communication system under such circumstances. Methods used: methods of analytical simulation and digital signal coding. The following results are obtained. Based on analysis of the operation of the UWB radio communication system revealed that the change in energy and autocorrelation function of received signals in the stream of information bits are the cause of intra-system interference that further causes an increase in bit error and degradation of the probabilistic characteristics of communication systems. Revealed analytical relationship allow us to calculate the probability dependence of occurring errors per bit depending on the signal-to-noise ratio or at different base signal values. Revealed the existence of local extremums for bit error characteristics at optimal UWB base values signals when the probability of a bit error becomes the smallest. That allows us to reasonably choose the best value of the UWB signal base and have high noise immunity and reliability of the digital information transmission system. Conclusion. Using UWB signal technology allows wireless covert transmission of information with low radiation power at a speed of 1-2 Mb/s with error occurrence probability per bit at the level of 10^{-4} - 10^{-6} when the signal-to-noise ratio is significantly less than one. Thus, a UWB radio system with a code modulation at the transmitter and spectral processing at the receiver has high noise immunity, which allows reliable transmission of digital information in an interfering environment.

Keywords: information transfer; noise immunity; stealth; spectral processing; correlation.

O. Shefer, B. Topikha, V. Shefer, S. Myhal

National University «Yuri kondratiuk Poltava Polytechnic», Poltava

SYNTHESIS OF INVENTORIES TO THE INTERFERENCE OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Abstract. The article deals with the development of analytical algorithms of information and telecommunication systems formation that are invariant to the obstacle (additive or non-additive). The basic approaches to determine the class of obstacles for which an invariant system can be constructed are discussed and analyzed in detail. It is established that the invariance property of a feedback system guarantees the given probability of receiving information, but it does not guarantee a preset speed of information transmission. Studies have shown that invariance is achieved by reducing the noise immunity of additive noise. In a second-order phase-difference modulation system, the error probability is invariant to the signal frequency, but it is greater than the error rate in the system with phase-difference modulation at a constant signal frequency. As a result of the conducted researches it is established that the maximum of the undetected error does not depend on the characteristics of the interference, but is determined solely by the parameters of the correction code. The ways of improving the qualitative characteristics of information and telecommunication systems to ensure their invariance to the obstacle have been determined by analytical means, which is confirmed by simulation results and experimental data.

Keywords: information and telecommunication system, invariance, error probability, adaptive obstacle, additive impediment, noise immunity.

Introduction

The main criterion of the effective functioning of modern information and communication systems (ICS) is the quality of data reception and transmission in all modes of their functioning, including critical ones. In practice, this problem has to be solved comprehensively, since in these systems, the useful signal and interference cannot substantially be completely separated.

The search for appropriate methods is acceptable only when the probability of transmitting information is guaranteed [1], and in critical modes (the action of concentrated interference) the property of system invariance is guaranteed to unpredictable disturbances.

The peculiarity of the problem of invariance of ICS is that the role of the invariant plays not the instantaneous value of the original value, but some of its statistical characteristics [2].

In ICS, obstacles acts as interference-suppressers and as a characteristic of a system, which must be an invariant of the interference is its noise immunity, expressed quantitatively, for example, because of the probability of error when it comes to discrete information transmission systems [3, 4].

The required error probability value depends on the type of information transmitted and ranges from 10^{-2} to 10^{-6} . If the error probability exceeds the acceptable values, then the transmission of messages becomes impossible due to unacceptably poor quality.

If the error probability exceeds the acceptable values, then the transmission of messages becomes impossible due to unacceptably poor quality.

Changes to the characteristics of the information channel are caused by a variety of obstacles inherently:

- the additive interference consists of a useful signal, and a mixture of signals comes to the input of the receiver. The parameters of the additive interference directly determine the immunity of the ITS, and if it is a

non-stationary random process, then the probability of transmitting information changes;

- non-additive interferences lead to changes in individual signal parameters and a channel that can be expressed by changes in signal parameters.

In order to ensure the acceptable quality of operation of a real digital transmission system, it is necessary to maintain the error probability at a level not exceeding a certain set value. This task can be considered fulfilled if [5]:

- the probability of error is less than the set one and remains unchanged, despite the presence of interferences that cause non-stationarity of the information channel;

- the probability of error under the influence of interference changes arbitrarily in the range of values below the set value and does not exceed this value under any circumstances.

The purpose of the article

- to receive basic analytical algorithms for constructing ICS invariant to additive or nonadditive obstacles, as well as to determine the class of obstacles for which it is possible to construct an invariant system.

- to identify ways to improve the performance of ICS to ensure its invariance to the obstacle.

- to establish the capabilities of different types of ICS in terms of achieving their invariance.

The main part

In practice, interference with spectrum-focused parameters is often present, because, unlike thermal noise power, their power is concentrated in a relatively narrow frequency band [2]. If this band is less than $1/T$, in the time interval T the focused interference can be represented as a harmonic oscillation with random amplitude, frequency and phase:

$$\xi(t) = a_n \cos(\omega_n t + \phi_n). \quad (1)$$

If the amplitude of the useful signal is a_s compared with the amplitude of the interference a_n , then the reception of the signal becomes impossible due to frequent failures. Unmistakable reception in these conditions can be ensured by choosing a useful signal of more complex shape than interference (1).

For example, we choose a signal in the form of harmonic oscillation which changes phase by phase:

$$S(t) = \text{sign}\left(\sin\frac{\pi}{\Delta T}t\right) a_s \cos(\omega_s t + \phi_s), \quad (2)$$

Where ΔT – duration of the element of composed signal, $\Delta T \ll T$.

Two signal components (2) having opposite initial phases are obtained experimentally and are shown in Fig. 1, b. We believe that the system performs phase or phase difference modulation of the signal (2). In Fig. 1, a representation of the interference (1) is presented, the case where the interference frequency coincides with the signal frequency $\omega_i = \omega_n$; the interference amplitude is also selected equal to the signal amplitude ($a_n = a_c$) for ease of comparison of the results of their processing at the receiver output.

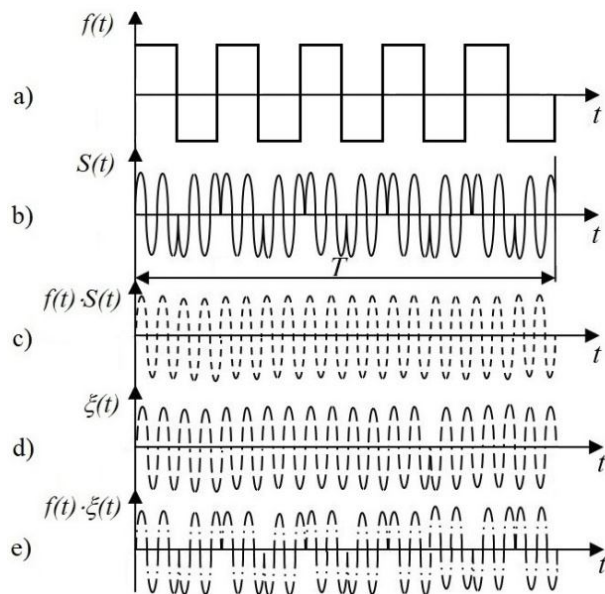


Fig. 1. Experimental data of harmonic signal and obstacle realization

Let us now follow the signal transformations and the interference in the receiver. The receiver (Fig. 2) consists of two sequentially included multipliers M_1 and M_2 , which multiply the received signal

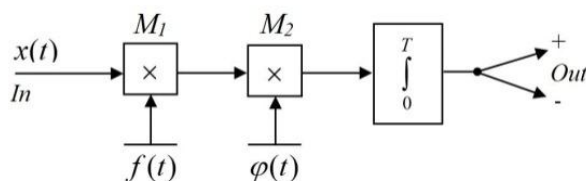


Fig. 2. Schematic diagram of the receiver of the sequential composite signal

$$x(t) = S(t) + \xi(t), \quad (3)$$

On the reference oscillations $f(t) = \text{sign} \sin\frac{\pi}{\Delta T}t$ and $\phi(t) = a_s \cos(\omega_s t + \phi_s)$, and integrator. Since the scheme is linear, one can consider separately the signal conversion and interference. The results of multiplication at output M_1 , respectively for the signal and interference are presented in Fig. 1, c, d.

As a result of multiplication, the broadband signal was turned into a narrowband and narrowband interference into a broadband signal. Since the next part of the circuit is a correlator consistent with the narrowband signal, the effect of broadband interference on the output of the integrator is negligible.

The Fig. 3 shows the output signal voltages (solid lines) and interferences (dashed lines) are obtained. Although the signal power is equal to the power of the interference, the effect of the interference at the output of the receiver is many times less than the effect of the signal.

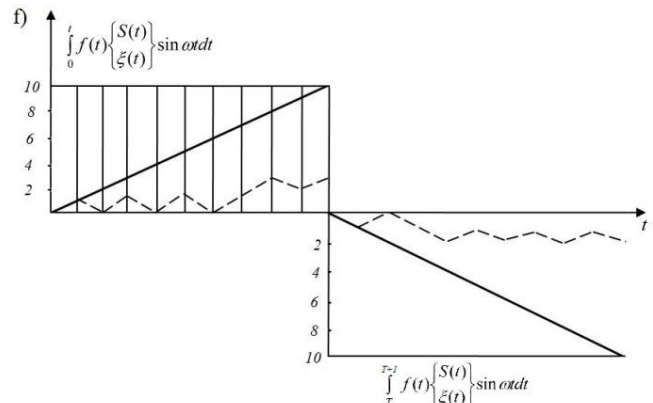


Fig. 3. Output signal voltage and interference

With the selected amplitude of the obstacle, no realization of it can lead to failure, that is, the system under consideration is completely invariant to the spectrum-limited obstacle with limited amplitude. This is achieved by the redundancy of a signal consisting of ten elements carrying the same information. By increasing the number of elements of a signal, its redundancy, it is possible to reduce the effect of the interference or, in the same way, to ensure the invariance of the system to interference with a large range of change in amplitude.

To provide invariance to amplitude interference $a_n \leq \max a_n = A_n$ it is necessary that the number of elements m of the composite signal (2) be not less than

$$m = 2 \div 3 \frac{A_n}{a_s}. \quad (4)$$

If relation (4) is being held, then the probability of error in this system is zero and thus,

$$p = \text{in var } \xi.$$

Following a given rate of information transmission, an increase in the redundancy of the signal

m leads to a proportional broadening of its spectrum, which is a charge for the achieved invariance of the system to a spectrum-focused interference [5].

In real broadband systems, it is complicated by the fact that, in addition to concentrated interference, they have fluctuating noise.

The noise immunity of the system with respect to fluctuation noise is determined by the ratio of the signal energy Q to the spectral density of the noise power σ_0^2 , the magnitude

$$h^2 = \frac{Q}{\sigma_0^2} = \frac{P_s T}{\sigma_0^2} = \frac{P_s}{P_n} \Delta f T, \quad (5)$$

where P_s – signal power, P_n – average interference power, T – signal duration, Δf – bandwidth of the channel, which does not depend on the shape of the signal, including the number of elements of the compound signal with a fixed energy.

Since the effect of fluctuation noise is entirely determined by the value of h , it is considered that the system is invariant to the interference from h is not changed under the influence of ξ .

As an invariant, we consider not the influence of the ξ , but a function $p(h)$.

In the broadband system under consideration, this function is not a strict invariant of influence but with a large redundancy of the composite signal, the function $p(h, \xi)$ is little different from function $p(h, 0)$ and, therefore, it is possible to speak about partial relative invariance of the system to interference ξ .

Mathematical notation corresponds to the concept of invariance relativity

$$p(h) \approx \text{in var } \xi. \quad (6)$$

The redundancy of composite signals is estimated to be the magnitude of their base, which is understood to be the product of the duration of a T signal on the width of its spectrum Δf . Because $\Delta f \approx 1/\Delta T$, then, the base of the signal is approximately equal to the number of elements of the compound signal: $\Delta f T = m$. By increasing the base of the signal, one can approximate function $p(h, \xi)$ to function $p(h, 0)$, that is, the relative invariant system to absolute invariance.

In the case of both interference – fluctuation noise and concentrated interference, relation (4) can be considered as a necessary but insufficient condition of invariance.

To obtain a sufficient condition, it is necessary to determine the dependence of the loser in the noise immunity (compared to the case of no obstacle ξ) from $\Delta f T$.

The noise immunity loss can be conveniently expressed as the equivalent increase in signal energy required to compensate for this loss. Let us estimate the energy loss caused by the appearance of a concentrated interference at the output of a coherent receiver, which calculates the convolution of the received signal $x(t)$ (3) and the reference oscillation $S(t)$:

$$J[x(t)] = \int_0^T x(t)S(t)dt. \quad (7)$$

The integral (7) is decomposed into two components:

$$J[x(t)] = \int_0^T S^2(t)dt + \int_0^T \xi(t)S(t)dt, \quad (8)$$

the first is equal to the energy of the useful signal, and the second is the effect of the interference. By decomposing the signal and the interference in the Fourier series at the interval $[0, T]$ and confining ourselves to only additives with frequencies inside the bandwidth of the channel, we obtain:

$$J[x(t)] = P_s T + \frac{T}{2} \sum_{k=k_1}^{k_2} a_k \alpha_k + b_k \beta_k, \quad (9)$$

where a_k, b_k – signal decomposition coefficients,

α_k, β_k – interference decomposition factors,

$k_2 - k_1 + 1 = \Delta f T$ – the basis of the signal.

If there was no ξ obstacle, the system's noise immunity would be determined by the signal energy $Q = P_s T$. In the presence of concentrated interference, the signal energy in the worst case, when the results of signal processing and interference have different signs, is reduced by

$$\gamma = \frac{T}{2} \sum_{k=k_1}^{k_2} a_k \alpha_k + b_k \beta_k$$

and gets equal:

$$Q_{ekv} = Q - |\gamma|. \quad (10)$$

Let's define the extremum of magnitude $|\gamma|$ by considering that the signal has a uniform spectrum and that $a_k = b_k = c$.

Then

$$\gamma = \frac{cT}{2} \sum_{k=k_1}^{k_2} \alpha_k + \beta_k. \quad (11)$$

Having calculated the Fourier coefficients α_k and β_k for the obstacle (1), we get

$$\begin{aligned} & \sum_{k=k_1}^{k_2} \alpha_k + \beta_k = \\ & = \sum_{k=k_1}^{k_2} \cos \phi_n \frac{\sin \Delta \omega_k T}{\Delta \omega_k T} + \sin \phi_n \frac{\cos \Delta \omega_k T - 1}{\Delta \omega_k T} \\ & \quad - \sin \phi_n \frac{\sin \Delta \omega_k T}{\Delta \omega_k T} + \cos \phi_n \frac{\cos \Delta \omega_k T - 1}{\Delta \omega_k T}, \end{aligned}$$

where $\Delta \omega_k = \omega_n - k \frac{2\pi}{T} = 2\pi(f_n - k/T)$.

Considering that

$$\left| \begin{matrix} \sin(\Delta\omega_k T + \phi_n) + \cos(\Delta\omega_k T + \phi_n) \\ -\sin \phi_n - \cos \phi_n \end{matrix} \right| < 3,$$

we get
$$\left| \sum_{k=k_1}^{k_2} \alpha_k + \beta_k \right| < 3a_n \sum_{k=k_1}^{k_2} 1/\Delta\omega_k T,$$

since $\Delta\omega_k = \omega_n - k \frac{2\pi}{T}$ and $k_1 \frac{2\pi}{T} \leq \omega_n \leq k_2 \frac{2\pi}{T}$.

Therefore, for the effect of noise on the output of the receiver the following estimate is valid:

$$|\gamma| < \frac{3ca_n T (\ln \Delta f T + 1)}{4\pi}. \tag{12}$$

Let's now find a quantity $q = Q/Q_{ekv}$ that shows in how many times the energy of the signal is greater than the equivalent energy of the signal, taking into account the effect of the concentrated interference. To do this, we express the magnitude of the decomposition coefficients of the signal due to its power. Having used the correlation

$$\sum_{k=k_1}^{k_2} a_k^2 + b_k^2 = P_c,$$

taking into account the equation $a_k = b_k = c$ we get:

$$c = \sqrt{\frac{P_s}{2\Delta f T}}. \tag{13}$$

Substituting (13) in (12), on the basis of (10) we get

$$q < \frac{Q}{Q - |\gamma|} \approx \left[1 - \frac{3}{4\pi} \sqrt{\frac{P_n}{P_s}} \frac{1}{\sqrt{\Delta f T}} \ln(\Delta f T + 1) \right]^{-1}. \tag{14}$$

It follows from (14) that for any fixed ratio of interference power to the power of the signal P_n/P_s , the effect of the interference effect by increasing the signal base $\Delta f T$ can be arbitrarily arbitrary. In particular, if the condition of invariance is given the maximum permissible excess of q, then one can find a base $\Delta f T$ at which a given degree of relative invariance of the broadband system under consideration will be achieved to the concentrated interference.

As a rule, the base cannot be increased indefinitely, because with a given symbol rate of $1/T$, this can only be done by extending the channel frequency band, which is always difficult. For example, in a shortwave radio channel, the bandwidth allocated to one station cannot exceed tens of kHz. Even if $\Delta f = 100$ kHz, then at a manipulation speed of 300 parcels / s ($T = 3/33$ ms) the base of the system is $\Delta f T = 330$.

With such a base, the maximum permissible excess of interference power over the signal power is only ten ($P_n/P_s=10$), if it is considered possible to reduce

by half ($q = Q/Q_{ekv}$) the equivalent energy of the signal (14).

As the bandwidth is widened, the likelihood of multiple narrowband interference increases, causing additional difficulties.

Therefore, the possibility of achieving invariance within systems with constant parameters is limited (which, however, does not imply that these possibilities should be neglected).

Let's consider a broadband system with a composite signal and an adaptive receiving device (Fig. 4). As elements of a compound signal, harmonic oscillations with frequencies $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ are used, and the signal itself is the sum of these oscillations.

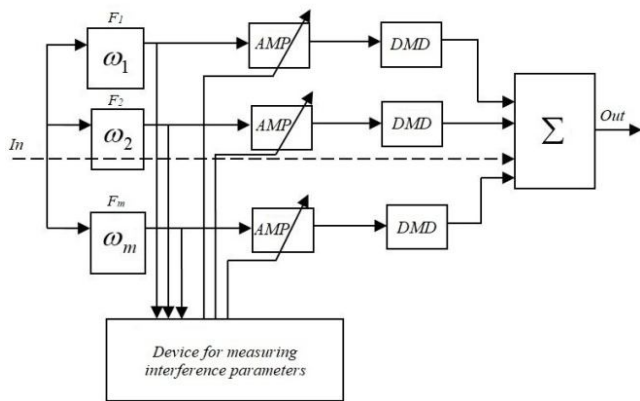


Fig. 4. Block diagram of an adaptive receiver of a parallel delivery channel

In the receiving device (Fig. 4), the signal passes through the bandpass filter system F_1, F_2, \dots, F_m with frequencies $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$, resulting in separate frequency components being completely separated at the outputs of the bandpass filters. Each element of the composite signal then passes through an amplifier with adjustable gear ratio and enters the demodulator. The demodulated elements of the composite signal are jointly processed in order to decide on the transmitted information symbol. Because they carry the same information, the transmitted symbol can be defined by the "voting method" in most demodulation results of the signal elements, in this case the adder Σ acts as a majority logic. In the case of the addition of analog voltages at the outputs of the demodulators, the adder is a device for adding analog signals.

In the output part of the adaptive receiver there is a processing unit of signals carrying the same information, and the resultant effect consists of partial effects on the outputs of the separation filters.

The possibility of achieving invariance in the system under consideration is based on the fact that the interference-focused noise channel passes only through one of the separation filters and, therefore, affects only one of the receiver m channels. If you exclude this affected channel from further processing, the system will be completely invariant to the interference that is ξ , it can be recorded as

$$p = in \text{ var } \xi = 0.$$

The device measuring the parameters of the noise is used to determine the affected channel. The algorithms of his work can be very different [6]. Since the composite signal has a large redundancy, comparing the result of the total signal processing with the results of processing in each channel, you can identify the least "quality" channel. The interference measurement device can determine the interference level in the communication channels by comparing the output level of each filter with the average output level of all separation filters. For any algorithm of operation of the device measuring the interference, it must produce a command to set the transmission coefficients of the corresponding amplifier. For significant interference in the i -th link, the transmission ratio of the i -th amplifier is almost zero.

With the presence, in addition to the concentrated interference ξ , also the fluctuation, in the considered system with variable parameters as in the system with constant parameters, only relative invariance to the interference ξ is possible. Indeed, when one of the channels of the receiver is blocked together with the interference, some of the useful signal is eliminated, so the probability of error in the presence of a concentrated interference is somewhat higher than without it. This increase in the probability of error can be made very small by increasing the redundancy of the signal and, accordingly, the number of receiving channels.

The advantage of a variable-invariant system over a constant-parameter invariant system is that it can provide invariance (absolute or relative) to an interference with a much larger range of amplitudes. In a system with constant parameters, invariance is ensured with respect to interference with amplitude not exceeding a certain value, depending on the base (redundancy) of the composite signal. In the system under consideration with variable parameters, the maximum permissible interference amplitude is independent of the signal base and is determined solely by the ability of the bandpass filters to suppress the signals lying on the frequency outside the bandwidth. It is easy to build filters with fading hundreds of times without the bandwidth, such a system can provide suppression of great interference. A large signal base is also required to ensure small noise immunity in the case of fluctuating noise in a variable parameter system.

The system under consideration with variable parameters is invariant to the noise-focused one; Compared to similar systems with constant parameters, it is invariant to a wider class of concentrated interference.

Generally a non-additive interference causes a random change in the signal parameters. Let's consider a signal with a random frequency. The causes that cause a change in the frequency of the signal are very varied: instability of task generators, rapid movement of the source of electromagnetic oscillations or changes in the medium reflecting these oscillations (Doppler Effect). [7, 8]. We believe that the output of the demodulator with constant parameters receives a signal

$$x(t) = a \sin[(\omega_0 + \xi)t + \phi], \quad (15)$$

where ξ – a random variable equal to the deviation of the signal frequency from the mean ω_0 .

Since the frequency of the signal is unknown, in the class of systems with constant parameters it is impossible to receive the signal (15) by a coherent or optimal incoherent method. Thus, autocorrelation technique should be used [6, 9].

The algorithm of autocorrelation signal reception with a single first-order phase difference modulation is of the form [10, 11]

$$I = \text{sign} \int_0^T x_n(t)x_{n-1}(t)dt, \quad (16)$$

where $I = \pm 1$ – transmitted information symbol, $x_n(t)$ i $x_{n-1}(t)$ – two consecutive signal parcels, equal, according to formula (15):

$$\begin{aligned} x_{n-1}(t) &= a \sin[(\omega_0 + \xi)t + \phi_{n-1}], (n-1)T \leq t \leq nT, \\ x_n(t) &= a \sin[(\omega_0 + \xi)t + \phi_n], nT \leq t \leq (n+1)T. \end{aligned} \quad (17)$$

The delay time τ is equal to the duration of the parcel T , but in real devices, these values are always different due to implementation errors.

As a result of carrying out a modelling the dimension of voltage at the output of signal was determined (fig. 5), the integral in the right part of the statement was calculated for this (16). It should be noted that the $(n-1)$ - a sending the signal after pairing it with the n th (by means of the delay line) will take the form

$$x_{n-1}(t) = a \sin[(\omega_0 + \xi)(t + \tau) + \phi_{n-1}].$$

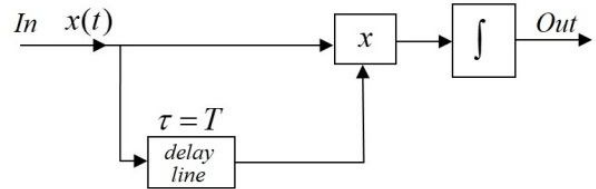


Fig. 5. Structural diagram of autocorrelation signal receiver with phase difference modulation

The result is

$$\begin{aligned} J &= \int_0^T a^2 \left(\begin{aligned} &\sin[(\omega_0 + \xi)t + \phi_n] \times \\ &\times \sin[(\omega_0 + \xi)(t + \tau) + \phi_{n-1}] \end{aligned} \right) dt = \\ &= \frac{a^2 T}{2} \cos(\phi_n - \phi_{n-1} + \xi\tau) + \frac{a^2}{4(\omega_0 + \xi)} \times \\ &\times (\sin(\phi_n + \phi_{n-1} + \xi\tau) - \sin(\phi_n + \phi_{n-1} + \xi\tau + 2\xi T)). \end{aligned} \quad (18)$$

When calculating expression (18), we take into account that

$$\omega_0 \tau \approx \omega_0 T \approx 2\pi k.$$

For simplicity we neglect the second term in (18). This can be done if

$$\omega_0 + \xi \gg 2\pi / T, \quad (19)$$

that is, in the case of a narrowband signal.

Then

$$J \approx \frac{a^2 T}{2} \cos(\phi_n - \phi_{n-1} + \xi \tau). \quad (20)$$

As can be seen from (20), with the phase difference modulation, the result of signal processing at the output of the autocorrelation receiver depends on the change in the frequency of the signal ξ . If $\xi \tau > \pi/2$, then the sign of the value J changes and according to algorithm (16) there will be an error in receiving the message.

Therefore, the phase difference modulation system is invariant to the interference that causes the signal frequency to change:

$$p \neq \text{in var } \xi.$$

Consider a second-order phase-difference modulation system in which information is embedded in a second phase difference signal equal to

$$\begin{aligned} \Delta^2 \phi &= (\phi_{n+1} - \phi_n) - (\phi_n - \phi_{n-1}) = \\ &= \phi_{n+1} - 2\phi_n + \phi_{n-1}, \end{aligned} \quad (21)$$

The scheme (Fig. 6) contains two autocorrelation signal receivers. On one of them the signal is received through an additional phase shifter, which changes the phase to $\pi/2$.

The voltages at the outputs of the integrators are proportional

$$\cos(\phi_n - \phi_{n-1}) \text{ and } \sin(\phi_n - \phi_{n-1}).$$

The part of the circuit consisting of elements of memory of constant voltages (RAM), multipliers of constant voltages

$$\begin{aligned} \cos \Delta^2 \phi_n &= \cos(\phi_n - \phi_{n-1}) \cos(\phi_{n+1} - \phi_n) + \\ &+ \sin(\phi_n - \phi_{n-1}) \sin(\phi_{n+1} - \phi_n). \end{aligned} \quad (22)$$

In general, the receiver (Fig. 6) implements such a mathematical algorithm for processing three consecutive signal parcels $x_{n-1}(t), x_n(t), x_{n+1}(t)$:

$$I = \text{sign}(X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}). \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} X_n &= \int_0^T x_{n+1}(t)x_n(t)dt \\ X_{n-1} &= \int_0^T x_n(t)x_{n-1}(t)dt \\ Y_n &= \int_0^T x_{n+1}(t)x_n^*(t)dt \\ Y_{n-1} &= \int_0^T x_n(t)x_{n-1}^*(t)dt \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

* the Hilbert transformations of the corresponding parcels are marked (this operation is performed by the phase shifter Fig. 6) [12, 13]. Carrying out calculations similar to (18) and (20) by (24), we obtain

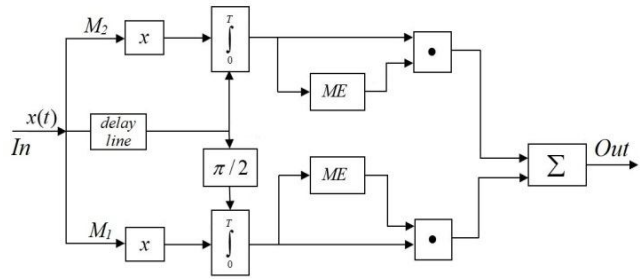


Fig. 6. Structural diagram of the autocorrelation signal receiver with second-order phase-difference modulation

$$\left. \begin{aligned} X_n &\approx \frac{a^2 T}{2} \cos(\phi_{n+1} - \phi_n + \xi \tau), \\ X_{n-1} &\approx \frac{a^2 T}{2} \cos(\phi_n - \phi_{n-1} + \xi \tau), \\ Y_n &\approx \frac{a^2 T}{2} \sin(\phi_{n+1} - \phi_n + \xi \tau), \\ Y_{n-1} &\approx \frac{a^2 T}{2} \sin(\phi_n - \phi_{n-1} + \xi \tau). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

where ξ – random signal frequency deviation, and τ – the duration of the signal delay in the circuit (Fig. 6), approximately equal to the duration of the parcel T .

Substituting (25) into (23), we obtain that the magnitude of the voltage at the output of the autocorrelation signal receiver with second-order phase-difference modulation becomes

$$\begin{aligned} J[x(t)] &= X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1} = \\ &= \frac{a^2 T}{2} \cos(\phi_{n+1} - 2\phi_n + \phi_{n-1}) = \text{in var } \xi. \end{aligned} \quad (26)$$

Therefore, the output voltage of the signal receiver with second-order phase-difference modulation is proportional to the second phase difference and does not depend on the signal frequency.

Thus,

$$p = \text{in var } \xi.$$

A system of transmitting discrete information with second-order phase-difference modulation is absolutely invariant to the signal frequency i .

However, invariance is achieved by reducing the noise immunity of additive noise. In a second-order phase-difference modulation system, the error probability is invariant to the signal frequency, but it is greater than the error probability in the phase-difference modulation system at a constant signal frequency. This provision is illustrated in Fig. 7, which presents a qualitative picture of the relationship between the noise immunity of second-order invariant phase-difference modulation and non-invariant phase-difference modulation.

In the absence of a frequency layout ($\xi = 0$), the probability of an error in a non-invariant system is less than the probability of an error in the invariant. However, if the requirement for noise immunity of the

information transmission system $p \leq p_{d\bar{i}\bar{i}}$ (dashed line in Fig. 7), the system with second-order phase difference modulation satisfies this requirement, and the system with phase difference modulation.

For a channel with an undetermined signal frequency, it is obvious that not only a second-order phase-difference modulation system is invariant.

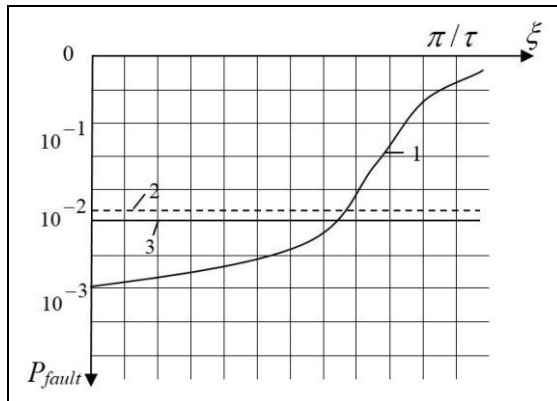


Fig. 7. Characteristics of noise immunity of invariant and non-invariant systems:
 1 - probability of error in the system with phase difference modulation ($P_{fault} = in \vartheta \xi$);
 2 - valid error probability;
 3 - probability of error in the system with phase-difference modulation of the second order ($P_{fault} = in \vartheta \xi$)

In some cases, there are a number of invariant (totally invariant) systems to a particular interference, and the question arises as to which one to choose. If the probability of error in several systems is an invariant of some interference, then the best, optimal invariant system is the one in which this probability is less.

Let's consider additive noise and fluctuation noise. We believe that the noise power varies indefinitely ($0 \dots \infty$).

The mathematical model of such interference is a non-stationary Gaussian random process with unlimited variance [14].

In such a non-stationary communication channel, invariance to the non-stationary interference can be ensured by adaptive ICS.

This system changes not only the algorithm of the receiver but also, in agreement with it, the algorithm of the transmitter.

Code combinations of length n are transmitted through the direct communication channel of this system, with symbols from each combination k being informative and others ($n - k$) valid.

The receiver's decoding device operates in error detection mode: if a fault is detected in this combination, a feedback channel sends a request to repeat the combination.

A mistaken combination is transmitted a second time; if the error is not detected, then the following combination is transmitted; if the error is detected again, a second request is sent, etc.

In such systems, one of the characteristics of fault tolerance is the probability of an undetected error $p_{i\bar{i}}$, since incorrect information is given to the consumer only if the error is not detected.

Let's suppose that the system under consideration specifies the maximum acceptable probability of an undetected error $p_{d\bar{i}edm}$:

$$p_{d\bar{i}} \leq p_{d\bar{i}edm} \quad (27)$$

We consider a system invariant to fluctuation noise if inequality (27) holds for all possible values of interference parameters.

If the probability of an undetected error is a monotonic function of the interference power, then the value $p_{i\bar{i}}$ will be max at the maximum interference power.

With interference power going to infinity, the probability of mistakenly registering one double character code combination is to $1/2$. Then any double combination is equally likely to occur at the decoder output. An error will not be detected if a combination of code-specific combinations is made of random double characters. Therefore, the maximum $p_{d\bar{i}}$ is equal to the ratio of the number of code combinations (n, k) of this code to the total number of double combinations of length n , max

$$p_{d\bar{i}} = 2^k / 2^n = 2^{k-n}.$$

The maximum of the detected error does not depend on the characteristics of the interference, but is determined solely by the parameters of the correction code; that is, if the noise is still indicated by ξ , then max

$$p_{d\bar{i}} = in \vartheta \xi.$$

If, $2^{k-n} \leq p_{d\bar{i}edm}$ besides, the adaptive ICS is invariant in the above value to the fluctuation noise.

The difference between the concept of invariance, which appears here, from the similar concept in the previous examples, where the probability of error did not change when changing the parameters of the interference should be emphasized; in this example, the error probability changes, but does not exceed some of the maximum permissible value under any parameters of interference. In other words, previously the invariant of the error was the probability of error, and now the invariant of the error is the acceptable maximum of this probability. However, in this case it is possible to speak about the invariance of the system, since the quality of telecommunications (in view of noise immunity) cannot be worse than the set in any circumstances.

Conclusions

The research has found a general reduction in the speed of information transmission due to the presence of interference at the entrance to the ICS and the use of code with redundancy.

As the power of the interference increases, the frequency of "rewriting" increases and the rate of information transmission slows down, and in the presence of a powerful interference the actual speed of information transmission drops to zero: in fact, in this mode the system "directs efforts" not to the transmission of information, but to "preventing" false ones combinations to the consumer.

It should be noted that, although the invariance property of a feedback system guarantees a given probability of information, it does not guarantee a predetermined rate of information transmission.

This is natural, because in this case the bandwidth of the communication channel is zero, and the only thing that can be achieved is not to receive erroneous information.

REFERENCES

1. LeSheng Jin, Martin Kalina, Radko Mesiar, Surajit Borkotokey. Characterizations of the possibility-probability transformations and some applications. *Information Sciences* 477, (2019) pp. 281-290.
2. Katok A. and Hasselblatt B. *Introduction to the Modern Theory of Dynamical Systems*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995, pp.705-706.
3. F. Colonius and C. Kawan. Invariance entropy for control systems. *SIAM J. Control Optim.* 48, no. 3 (2009), 1701–1721.
4. G. Nair and R. Evans, Exponential stabilisability of finite-dimensional linear systems with limited data rates, *Automatica*, 39 (2004), pp. 585–593.
5. Cherneva G. D. Application of the theory of invariance for noise-resistance estimation of transportation information systems. *International scientific journal "trans motauto world"* Year III, Issue 2, (2018) pp. 70-72.
6. Erokhin V. F., Pelyshok E. V. *Information Technology and Security* no. 1(1) (2012), pp. 42-53.
7. C. Neipp et al., "An analysis of the classical Doppler effect," 2003 *Eur.J.Phys.* 24, pp. 497-505.
8. V. C. Chen, F. Li, S.-S. Ho, and H. Wechsler. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42(1) (2006) pp. 2-19.
9. Steklov V.K. *Teoriya elektrychnogo zv'yazku: pidruchnyk* / V.K. Steklov, L.N. Berkman. – K.:Tehnika, 2006. – P. 548.
10. Smirnov V.S, Samkov A.V., T.V. Bulgach. Organization invariant intensive - converting systems to the prediction for hardware telecommunications equipment // *Naukova- virobnichy magazine Administratsii zv'yazku that radiochastot Ukraine "phone reception"*. – 2009. – Vip. 4 (88) . – S. 47 - 51.
11. Tolubko, V. B. Formuvannya bagatopozycijnogo sygnalu tehnologij 5G na bazi fazoriznycevoyi modulyaciyi vysokogo porjadku / V. B. Tolubko, L. N. Berkman, S. V. Kozelkov // *Zv'yazok*. – 2016. – no. 4. – pp. 5–7.
12. M. Feldman. Theoretical analysis and comparison of the Hilbert transform decomposition methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 22 (3), (2008) pp. 509-519.
13. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
14. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
15. Wim van Drongelen. *Signal Processing for Neuroscientists (Second Edition)* 2018, pp. 251-288.
16. Kapoor, A., Grauman, K., Urtasun, R. and Darrell, T. Gaussian Processes for Object Categorization, 2010. *International Journal of Computer Vision*, Vol 88(2), pp. 169-188.

Received (Надійшла) 11.10.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.12.2019

Синтез інваріантних до перешкоди інформаційно-телекомунікаційних систем

О. В. Шефер, Б. В. Топіха, В. О. Шефер, С. В. Мигаль

Анотація. Стаття присвячена розробленню аналітичних алгоритмів побудови інформаційно-телекомунікаційних систем інваріантних до перешкоди (адитивної або неадитивної). Детально розглянуті та проаналізовані основні підходи визначення класу перешкод для яких можна побудувати інваріантну систему. Встановлено, що властивість інваріантності системи зі зворотним зв'язком гарантує задану вірогідність прийому інформації, але вона не гарантує наперед задану швидкість передачі інформації. Проведені дослідження показали, що інваріантність досягається за рахунок зниження завадостійкості стосовно адитивних завод. У системі з фазорізницевою модуляцією другого порядку імовірність помилки інваріантна до частоти сигналу, але вона більша, ніж імовірність помилки в системі з фазорізницевою модуляцією при незмінній частоті сигналу. Отже, дослідження виявило загальне зниження швидкості передачі інформації через наявність перешкод на вході в систему та використання коду із надмірністю. Зі збільшенням потужності перешкод збільшується частота «переписування», а швидкість передачі інформації сповільнюється, а за наявності потужної перешкоди фактична швидкість передачі інформації падає до нуля: фактично в цьому режимі система "спрямовує зусилля" не на передачу інформації, а на "запобігання" помилковим комбінаціям споживача. У результаті проведених досліджень встановлено, що максимум невиявленої помилки не залежить від характеристик завади, а визначається винятково параметрами коригувального коду. Аналітичним шляхом визначені шляхи поліпшення якісних характеристик інформаційно-телекомунікаційних систем для забезпечення їх інваріантності до перешкоди, що підтверджено результатами моделювання та експериментальними даними. Слід зазначити, що, хоча властивість інваріантності системи зворотного зв'язку гарантує задану імовірність інформації, вона не гарантує заздалегідь задану швидкість передачі інформації. Це природно, тому що в цьому випадку пропускна здатність каналу зв'язку дорівнює нулю, і єдине, чого можна досягти, - це не отримувати помилкову інформацію.

Ключові слова: інформаційно-телекомунікаційна система, інваріантність, ймовірність помилок, адаптаційна перешкода, адитивна перешкода, захищеність від шуму.

С. Г. Шило, Д. В. Головняк, С. І. Хмелевський, О. О. Тімочко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МЕТОД СУМІСНОЇ ОБРОБКИ КООРДИНАТНОЇ ТА ОЗНАКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Предметом вивчення в статті є процес сумісної обробки координатної та ознакової інформації в системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення. Метою є розробка методу сумісної обробки координатної та ознакової інформації в системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення, що дозволяє врахувати інформаційні можливості різнотипних джерел про параметри траєкторій, сигнальні, траєкторні та оперативно-тактичні ознаки, а також використовувати інтелектуальні технології для розпізнавання повітряних об'єктів. **Завдання.** Наведено результати досліджень щодо удосконалення методів та алгоритмів третинної обробки радіолокаційної інформації в системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення. Запропоновано метод сумісної обробки координатної та ознакової інформації в системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення, що відрізняється від відомих урахуванням інформаційних можливостей різнотипних джерел про параметри траєкторій, сигнальних, траєкторних та оперативно-тактичних ознак, а також використанням інтелектуальних технологій розпізнавання повітряних об'єктів. Отримані такі **результати.** Розроблений метод сумісної обробки координатної та ознакової інформації в системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення. **Висновки.** Розроблений метод має усунути недоліки притаманні існуючим методам, і за рахунок цього підвищити якість інформації про повітряну обстановку. Встановлено, що використання запропонованого методу сприяє забезпеченню вимог споживачів щодо оперативності та якості інформації про повітряну обстановку.

Ключові слова: повітряні об'єкти, джерела радіолокаційної інформації, координатні параметри, різнотипні ознаки, гіпотези сумісного ототожнення вимірів, вирішальні правила.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Процес виявлення-спостереження повітряних об'єктів (ПО) в комплексах засобів автоматизації (КЗА) спеціального призначення відбувається в складних умовах радіолокаційного спостереження. До основних чинників, які впливають на якість радіолокаційної інформації (РЛІ) відносяться маневрування та постановка активних та пасивних завад ПО, впровадження заходів щодо зменшення помітності, радіоелектронна протидія, природний шумовий фон, рельєф місцевості, тощо.

Тому процес радіолокаційного спостереження в зоні відповідальності КЗА спеціального призначення характеризується випадковим характером та епізодичністю та переривчастістю, що напряму впливає на якість отриманих оцінок для підготовки прийняття рішень по протидії повітряним атакам супротивника [1-6].

Своечасність та якість виявлення-супроводження ПО в КЗА спеціального призначення можливо забезпечити тільки за умови використання максимально можливого повного спектру інформації, що надходить від різнотипних джерел РЛІ та застосуванням оптимальних методів траєкторної обробки РЛІ, що дозволяють врахувати розбіжності в складі та змісті координатної та ознакової інформації від системи різнотипних джерел [6, 7].

Мета статті. В статті розглядається метод сумісної обробки координатної та ознакової інформації в системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення, що дозволяє врахувати інформаційні можливості різнотипних джерел про параметри траєкторій, сигнальні, траєкторні та опе-

ративно-тактичні ознаки, а також використовувати інтелектуальні технології для розпізнавання ПО. Він має усунути недоліки притаманні існуючим методам, і за рахунок цього підвищити якість інформації про повітряну обстановку, що видається на КП спеціального призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність дослідження. Існуючі методи об'єднання координатної та ознакової інформації про повітряну обстановку не враховують розбіжностей щодо складу інформації від джерел. Крім того процеси обробки координатної та ознакової інформації реалізуються розрізнено, повний спектр отриманих джерелами РЛІ ознак не використовується, а це в підсумку не дозволяє КЗА спеціального призначення у вказаних умовах забезпечити потрібні для споживачів значення показників якості інформації про повітряну обстановку [1-5].

Оскільки досягнення нормативних вимог щодо оперативності та якості РЛІ забезпечує отримання цілевказівок спеціальними засобами без необхідності подальшого допощуку повітряних цілей, то відповідно і розробка методу сумісної обробки координатної та ознакової інформації в системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення, що дозволяє врахувати інформаційні можливості різнотипних джерел про параметри траєкторій, сигнальні, траєкторні та оперативно-тактичні ознаки, а також використовувати інтелектуальні технології для розпізнавання ПО, що в підсумку призводить до зменшення величини похибок оцінювання є нагальним науковим завданням, що потребує свого вирішення.

Аналіз літератури. В КЗА спеціального призначення останніх технологічних поколінь реалізова-

но методи та алгоритми траєкторної обробки РЛІ, що дозволяють реалізовувати багатоцільовий підхід при виявленні та супроводженні траєкторій ПО та проводити оптимальне об'єднання даних в мультирадарних системах [5, 8, 10]. Це суттєво знизило недоліки притаманні мультирадарним системам обробки РЛІ та дозволило відмовитись від значної кількості спрощень, що впроваджені при реалізації алгоритмів вторинної та третинної обробки РЛІ в сучасних КЗА спеціального призначення [5, 10].

Стосовно проблеми оптимізації об'єднання РЛІ від множини джерел в роботах [8-11, 14-20] розглянуті методи та алгоритми об'єднання інформації, що реалізують принцип сумісної обробки оцінених значень координат ПО від нерівноточних ДРЛІ.

Приведені оцінки ефективності запропонованих методів свідчать про покращення точнісних оцінок параметрів узагальнених траєкторій ПО в середньому на 15 – 20% та про зниження вартості обробки інформації пропорційно збільшенню кількості вимірвачів [9, 13].

Однак запропоновані методи та алгоритми об'єднання інформації використовують інформацію тільки про координатні параметри ПО. Ознакова інформація в КЗА спеціального призначення використовується тільки в окремих випадках для усунення суперечностей та в неавтоматизованому режимі. Розбіжності різнотипних джерел щодо складу видаваної інформації про сигнальні, траєкторні та оперативно-тактичні ознаки ПО, а також результати попереднього розпізнавання типів ПО, враховано недостатньо або ж не враховано взагалі. Це може призводити до прийняття помилкових рішень при оцінюванні параметрів потоку ПО та знижувати ефективність функціонування КЗА спеціального призначення [7, 8, 12].

Основна частина

Вихідні передумови та вибір реалізації підходу до третинної обробки РЛІ. В існуючих і перспективних КЗА спеціального призначення можливі наступні варіанти реалізації процесів об'єднання інформації про повітряну обстановку:

1. Джерела вимірюють в кожному періоді огляду координатні і ознакові параметри ПО і видають виміряні (істинні та помилкові) значення координатних параметрів відміток і спостережуваних ознак ПО в систему траєкторної обробки інформації КЗА спеціального призначення, де реалізується процес об'єднання РЛІ, тобто вирішується завдання виявлення-супроводу узагальнених траєкторій і класифікації ПО.

Даний підхід не враховує відмінностей в можливостях різнотипних джерел зі спостереження, обробки і змісту видаваної РЛІ, зокрема можливості частини джерел системи формувати траєкторії і проводити попереднє розпізнавання, наприклад, на підставі аналізу отримуваних радіолокаційних дальнісних портретів [8]. Це не дозволяє досягти потенційних можливостей системи траєкторної обробки РЛІ за якістю видаваної інформації.

2. На кожному з джерел реалізуються процеси первинної і вторинної обробки РЛІ, результати яких, у вигляді повідомлень про координатні параметри траєкторій і значення ознак або результати попереднього розпізнавання ПО в алфавітах класів джерел, видаються в систему траєкторної обробки КЗА спеціального призначення, де реалізується процес узагальнення інформації про параметри траєкторій ПО, сформованих на джерелах.

Практична реалізація цього підходу ускладнена тим, що існуючі методи і алгоритми не дозволяють враховувати істотні відмінності в можливостях різнотипних джерел зі спостереження, обробки і змісту видаваної інформації. При функціональній спроможності такої реалізації, використання відомих методів, що не враховують відмінностей у складі інформації, яка видається джерелами для подальшої обробки і апріорній невизначеності РЛІ, призводить до зниження якості інформації про повітряну обстановку, за рахунок накопичення і зростання помилок оцінювання параметрів траєкторій ПО на джерелах, а також із-за помилок в класифікації ПО внаслідок обмеженості алфавітів класів ПО окремих джерел і неспівпадіння їх з алфавітом класів КЗА спеціального призначення, що зрештою сприяє виникненню значного числа дублюючих траєкторій ПО і веде до зниження достовірності інформації.

Враховуючи попередні результати досліджень, згідно з яким доцільно проводити спільне узагальнення координатної і ознакової інформації, з урахуванням особливостей функціонування різнотипних джерел РЛІ, пропонується наступний варіант реалізації процесу об'єднання інформації про повітряну обстановку в КЗА спеціального призначення.

На кожному з джерел, залежно від особливостей їх функціонування, реалізуються процеси виявлення-виміру координатних параметрів ПО (відміток або координатних параметрів траєкторій ПО), а також, залежно від можливостей джерел, формуються вектори спостереження ознак, або розраховуються значення мір правдоподібності по заздалегідь розпізнаних класах (типах) ПО в алфавітах класів ПО джерел. Процеси зв'язки, супроводу узагальнених траєкторій, а також остаточного розпізнавання (уточнення) класів (типів) ПО здійснюються в КЗА спеціального призначення шляхом сумісного об'єднання вимірних значень координатних і ознакових параметрів ПО, з урахуванням несуперечності ознак ПО і результатів попереднього розпізнавання від джерел. При цьому реалізація комплексного алгоритму вторинної і третинної обробки РЛІ в КЗА спеціального призначення необхідно приймати рішення про тотожність вимірів різнотипних джерел, формувати часткові траєкторії на підставі сукупності відміток, що поступають від джерел, які здійснюють тільки внутрішню оглядову обробку РЛІ, і вже після цього приймати рішення про кількість ПО, параметри узагальнених траєкторій і класи ПО.

Розглядаючи можливі підходи до реалізації процесів об'єднання РЛІ від сукупності різнотипних джерел, необхідно також відмітити, що при роздільній обробці РЛІ обчислювальними засобами окремих дже-

рел, в ході реалізації процедур траєкторної обробки проявляється такий недолік, як неповнота інформації, обумовлена обмеженими можливостями джерел зі спостереження і втратами при обробці інформації на окремих джерелах. При цьому складність моделі руху ПО, що обумовлена її істотною нелінійністю, призводить до зниження точності і достовірності отримуваних оцінок при реалізації алгоритмів траєкторної обробки в системах координат джерел.

Вхідними даними для алгоритму ототожнення вимірних значень координатних і некоординатних параметрів ПО і оцінювання їх кількості є вихідні дані алгоритмів обробки РЛІ на різнотипних джерелах. При цьому необхідно використовувати результати як внутрішньо оглядової, так і вторинної обробки РЛІ на різнотипних джерелах, що дозволить врахувати особливості їх функціонування.

Зміст методу сумісної обробки координатної та ознакової інформації системах обробки радіолокаційної інформації спеціального призначення. Метод передбачає виконання наступних процедур третинної обробки РЛІ [8, 10, 11]:

а) приведення множини вимірів координатних параметрів ПО, отриманих від сукупності різнотипних джерел, до єдиного моменту часу;

б) перерахунок вимірних джерелами значень координатних параметрів ПО в систему координат КЗА спеціального призначення;

в) ухвалення рішень про тотожність вимірних значень координат і ознак ПО від різнотипних джерел;

г) оцінка кількості ПО, що знаходяться в радіолокаційному полі сукупності різнотипних джерел.

Процедури приведення вимірів різнотипних джерел до єдиного моменту часу і єдиної системи координат відносяться до попередньої обробки РЛІ при ототожненні вимірів координатних параметрів. При цьому передбачається, що різнотипні джерела здійснюють огляд простору з постійним і, в загальному випадку, неспівпадаючим періодом T_0 . Вектор спостереження координатних параметрів ПО \vec{y}_Σ містить вимірні значення похилої дальності, азимута і кута місця

$\vec{y}_\Sigma = (\hat{r}_\Sigma, \hat{\beta}_\Sigma, \hat{\varepsilon}_\Sigma)^T$. Введемо також припущення, що у більшості випадків, виконується на практиці про те, що виміри різнотипних джерел (вектори спостереження координатних параметрів \hat{y}_Σ) характеризуються випадковими помилками, розподіленими за нормальним законом з відомими СКВ, $-\sigma_{\hat{y}_\Sigma}$ [8, 12, 20]. Від джерел з траєкторним виходом для подальшої обробки надходять параметри сформованих траєкторій.

У алгоритмах траєкторної обробки на таких джерелах, як і в КЗА спеціального призначення, використовується поліноміальна модель руху повітряних об'єктів [8-11].

Вектор спостереження некоординатних параметрів \vec{x}_Σ , залежно від можливостей конкретних джерел з отримання ознакової інформації, може містити вимірні значення різнотипних ознак. Також передбачається, що виміри ознак різнотипними джерелами (складові векторів \hat{x}_Σ) характеризуються випадковими помилками, розподіленими за нормальним законом з відомими СКВ, $-\sigma_{\hat{x}_\Sigma}$.

Під час попередньої обробки вимірів координатних параметрів повітряного об'єкту, що поступили від джерел, реалізуються процедури а) і б), результатом яких є перерахунок координат повітряного об'єкту з полярної системи координат джерел в прямокутну систему координат КЗА спеціального призначення, відповідно до відомих методів, приведених в [8-10].

Також виміри приводяться до єдиного моменту часу шляхом виконання процедур екстраполяції, відповідно до прийнятої моделі руху ПО, згідно пропонуваним.

Після реалізації операцій попередньої обробки РЛІ, що надійшла від джерел, приймаються рішення про тотожність вимірів координатних та ознакових параметрів, які поступили від різнотипних джерел, при цьому, одним з істотних і складних моментів при ототожненні є вибір опорного виміру.

Пропонується при визначенні неузгодження між вимірами різнотипних джерел $\Delta m_k = m_{s_j} - m_{p_j}$ в якості опорного вибирати вимір координат і ознак що відповідає критерію мінімуму спільної дисперсії помилок

$$\min_{\sigma_{\Delta k} \sigma_{\Delta z}} (l, \vec{y}_k, \vec{x}_z; \varphi / n, \vec{\mu}, T) \longrightarrow \vec{y}_k \vec{x}_z, \quad (1)$$

де $\vec{y}_k \vec{x}_z$ – виміри координат і ознак, вибрані в якості опорних при ототожненні від φ -го джерела. Отже опорна точка, що обрана для ототожнення є функцією точності φ -го джерела РЛІ.

Тобто згідно критерію (1), при прийнятих припущеннях, в якості опорного і визначаючого центр багатовимірного строга ототожнення, доцільно вибирати вимір найбільш точного джерела.

Розмірність і величина багатовимірного строга ототожнення визначаються розмірністю простору ототожнюваних координатних і некоординатних параметрів повітряного об'єкту, тобто розмірністю векторів спостереження від джерел, що здійснюють первинну обробку РЛІ і розмірністю векторів стану від джерел з цифровим траєкторним виходом, а також величиною результуючої дисперсії по кожному параметру, що ототожнюється.

Загальне правило для ототожнення вимірів має такий вид:

$$\left\{ e \frac{\alpha_k \Delta y_k}{\sigma_{\Delta k}^2} - e \frac{\alpha_k \Delta y_k}{\sigma_{\Delta k}^2} \right\} \leq \frac{1}{\gamma_k} e \frac{\alpha_k^2}{2\sigma_{\Delta k}^2} \wedge \left\{ e \frac{\beta_z \Delta x_z}{\sigma_{\Delta z}^2} - e \frac{\beta_z \Delta x_z}{\sigma_{\Delta z}^2} \right\} \leq \frac{1}{\gamma_z} e \frac{\beta_z^2}{2\sigma_{\Delta z}^2} \wedge \Delta \vec{K} = 0, \quad (2)$$

де γ_k і γ_z – порогові значення для ухвалення рішення про тотожність вимірних значень координатних параметрів і параметричних ознак, відповідно; $\Delta\vec{K}$ – відхилення вимірних значень складових вектору логічних оперативно-тактичних ознак, \wedge – знак кон'юнкції, що означає логічну операцію

Слід зазначити, що чим більшою є розмірність вказаних векторів і значення величин дисперсій вимірів і оцінок параметрів часткових траєкторій, отриманих на джерелах, тим більшою є розмірність строба ототожнення і допустима величина розбіжності по кожному з параметрів, що ототожнюються. Проте при виборі опорного виміру і розмірів багатовимірного строба для ототожнення вимірів джерел, окрім характеристик точності, необхідно враховувати також чинник апріорної невизначеності радіолокаційної інформації і епізодичне спостереження різнотипними джерелами.

Правило для ухвалення рішення про тотожність вимірів координатних параметрів від l -го і k -го джерел, що здійснюють тільки первинну обробку РЛІ має вигляд:

$$\left(\hat{y}_{l\alpha}^j - \hat{y}_{k\alpha}^i \right) C_{yl}^{-1} C_{yk}^{-1} \left(\hat{y}_{l\alpha}^j - \hat{y}_{k\alpha}^i \right)^T \leq \gamma_{\hat{y}_{\Sigma}} \quad (3)$$

де $\hat{y}_{l\alpha}^j$, $\hat{y}_{k\alpha}^i$ – виміряні l -м і k -м ДРЛІ значення координатних параметрів j -го і i -го ПО, рішення про

$$\left[\left(\hat{X}_{n\alpha}^i - \hat{X}_{m\alpha}^j \right) \leq \Delta X^{nop} \right] \wedge \left[\left(\hat{Y}_{n\alpha}^i - \hat{Y}_{m\alpha}^j \right) \leq \Delta Y^{nop} \right] \wedge \left[\left(\hat{H}_{n\alpha}^i - \hat{H}_{m\alpha}^j \right) \leq \Delta H^{nop} \right] \wedge \left[\left(\hat{X}_{n\alpha}^i - \hat{X}_{m\alpha}^j \right) \leq \Delta \dot{X}^{nop} \right] \wedge \left[\left(\hat{Y}_{n\alpha}^i - \hat{Y}_{m\alpha}^j \right) \leq \Delta \dot{Y}^{nop} \right] \wedge \left[\left(\hat{H}_{n\alpha}^{iT} - \hat{H}_{m\alpha}^{jOB} \right) \leq \Delta \dot{H}^{nop} \right] \quad (5)$$

де $\hat{X}_{n\alpha}^i$, $\hat{X}_{m\alpha}^j$, $\hat{Y}_{n\alpha}^i$, $\hat{Y}_{m\alpha}^j$, $\hat{H}_{n\alpha}^i$, $\hat{H}_{m\alpha}^j$, $\hat{X}_{n\alpha}^j$, $\hat{X}_{m\alpha}^i$, $\hat{Y}_{n\alpha}^j$, $\hat{Y}_{m\alpha}^i$, $\hat{H}_{n\alpha}^j$, $\hat{H}_{m\alpha}^i$ – оцінки координатних параметрів i -ої та j -ої траєкторій ПО, що надходять від n -го і m -го джерел з траєкторним виходом в α -м такті оновлення інформації; ΔX^{nop} , ΔY^{nop} , ΔH^{nop} , $\Delta \dot{X}^{nop}$, $\Delta \dot{Y}^{nop}$, $\Delta \dot{H}^{nop}$ – порогові значення, що визначають розміри відповідно строба ототожнення вимірів.

Таким чином, правила перевірки відповідності координатних і некоординатних параметрів ототожнюваних вимірів від різнотипних джерел ґрунтуються на отриманих оптимальних правилах і полягають в перевірці попадання вимірів різнотипних джерел в строб ототожнення, сформований навколо відібраного за критерієм (1) виміру від найбільш точного джерела.

Реалізація процедури γ в алгоритмах третинної обробки РЛІ в КЗА спеціального призначення викликає істотні труднощі із-за необхідності обліку відмінностей в розмірах, конфігурації і взаємного просторового положення зон огляду різнотипних джерел.

Крім того, оцінювання кількості ПО, що знаходяться в зоні огляду сукупності різнотипних джерел, істотно залежить від міри апріорної невизначеності РЛІ. Тому ухвалення рішень про кількість ПО доцільно здійснювати під час висунення і перевірки різнорідних статистичних гіпотез.

тотожність яких приймається в α -му такті оновлення інформації; C_{yl}^{-1}, C_{yk}^{-1} – коефіцієнти, що враховують помилки виміру координатних параметрів ПО відповідними ДРЛІ; $\gamma_{\hat{y}_{\Sigma}}$ – пороговий рівень, що задає розміри багатовимірного строба ототожнення для координатних параметрів.

Правило для перевірки відповідності векторів спостереження ознак матиме вигляд:

$$\left(\hat{x}_{l\alpha}^j - \hat{x}_{k\alpha}^i \right) C_{xl}^{-1} C_{xk}^{-1} \left(\hat{x}_{l\alpha}^j - \hat{x}_{k\alpha}^i \right)^T \leq \gamma_{\hat{x}_{\Sigma}} \quad (4)$$

де $\hat{x}_{l\alpha}^j$, $\hat{x}_{k\alpha}^i$ – виміряні l -м і k -м джерелами значення ознакових параметрів j -го та i -го повітряного об'єкта, рішення про тотожність яких приймається в α -м такті оновлення інформації; C_{xl}^{-1}, C_{xk}^{-1} – коефіцієнти, що враховують помилки виміру ознакових параметрів повітряного об'єкта відповідними джерелами; $\gamma_{\hat{x}_{\Sigma}}$ – пороговий рівень, що задає розміри багатовимірного строба ототожнення для ознакових параметрів.

Правило для прийняття рішень про тотожність оцінок параметрів i -ї та j -ї траєкторій по приналежності їх одному повітряному об'єкту має такий вигляд:

Враховуючи особливості вирішення задачі узагальнення інформації про повітряну обстановку, та отримані оптимальні вирішальні правила оцінювання кількості ПО, що знаходяться в зоні огляду гіпотетичного радіолокатора, що складається з зон огляду різнотипних джерел радіолокаційної інформації, що в тому числі можуть перетинатися, а також розривів між ними, необхідно розробити вирішальні правила з урахуванням наступних ситуацій, що виникають під час радіолокаційного спостереження.

1. Зона огляду одного з джерел системи Ω_{Δ} повністю охоплює зони огляду інших ДРЛІ, при цьому можливі наступні ситуації:

а) в КЗА спеціального призначення надходить РЛІ, за умови повного спостереження усіх ПО усіма джерелами системи $P(\Pi_{\varphi\xi}(t) = 1)$, в цьому випадку загальна кількість ПО, що знаходяться в зоні огляду такого гіпотетичного радіолокатора, дорів-

новатиме кількості ПО, що спостерігаються джерелом з найбільшою зоною огляду Ω_Λ ;

б) в КЗА спеціального призначення надходить РЛП, за умови спостереження деяких (частини) ПО тільки джерелами з мінімальними зонами огляду Ω_Y . Наприклад, ПО здійснює політ з обгинанням рельєфу місцевості на надмалих висотах, при цьому джерелами з більшою зоною огляду Ω_Λ , що покриває Ω_Y , такі ПО спостерігатися не будуть, у тому числі можливо і за дії інших чинників, зазначених у вступі та при постановці завдання. Загальна кількість повітряних об'єктів в цьому випадку знаходитиметься як сума повітряних об'єктів, що спостерігаються джерелами з мінімальними зонами огляду, доповнене кількістю ПО, що знаходяться поза перетином зон огляду сукупності джерел, тобто таких, що спостерігаються тільки джерелом радіолокаційної інформації з найбільшою зоною огляду;

в) комбінація двох попередніх ситуацій, коли частина повітряних об'єктів спостерігається тільки окремими джерелами, а частина повітряних об'єктів спостерігається в перетині зон огляду декількох (усіх) джерел системи – при цьому оцінка кількості ПО повинна знаходитися після ухвалення рішень про тотожність вимірів різнотипних ДРЛП, згідно (3-5). Рішення про кількість повітряних об'єктів,

в цьому випадку, доцільно приймати за критерієм максимуму правдоподібності гіпотези ототожнення множини вимірів сукупності джерел радіолокаційної інформації:

$$\max_n L_\alpha \left(\begin{matrix} n, \bar{\mu}_\Sigma, \bar{T}_\Sigma / l, \\ \bar{y}_{\rho\Sigma}, \bar{x}_{\rho\Sigma}, \\ n_s, \bar{\mu}_{s\Sigma}, T_{s\Sigma} \end{matrix} \right) \rightarrow n^*, \quad n = \overline{1, n_{\max}}. \quad (6)$$

2. Оцінюванню в КЗА спеціального призначення підлягають ПО, частина з яких знаходиться тільки в частинах зон огляду окремих джерел, що не перетинаються, а частина знаходиться в перетині зон огляду сукупності (декількох) джерел радіолокаційної інформації, при цьому загальна кількість ПО знаходиться як сума ПО, які спостерігаються в усіх частинах зон огляду окремих джерел радіолокаційної інформації, що не перетинаються, доповнена оцінкою кількості ПО, що знаходяться в перетинах зон огляду ДРЛП, після ухвалення рішень про тотожність вимірів різнотипних джерел згідно (1-3).

Формалізоване правило для ухвалення рішення про кількість ПО n^* , що знаходяться в зоні огляду Ω_Φ сукупності різнотипних джерел, з урахуванням оптимальних правил ототожнення вимірів і розглянутих особливостей матиме вигляд:

$$\left[\bigcup_{\Omega_\Phi} \max_n L_{\Omega_\Lambda} \left(n, \bar{\mu}_\Sigma, \bar{T}_\Sigma; \Omega_\Phi / l, \bar{y}_{\rho\Sigma}, \bar{x}_{\rho\Sigma}, n_s, \bar{\mu}_{s\Sigma}, T_{s\Sigma} \right) \left\{ P(\Pi_{\Omega_\Phi \xi}(t) = 1) \right\} \right] \wedge \\ \wedge \left[\bigcap_{\Omega_\Phi} \max_n \min_{\Omega_Y} L_{\Omega_Y} \left(n, \bar{\mu}_\Sigma, \bar{T}_\Sigma; \Omega_\Phi / l, \bar{y}_{\rho\Sigma}, \bar{x}_{\rho\Sigma}, n_s, \bar{\mu}_{s\Sigma}, T_{s\Sigma} \right) \left\{ P(\Pi_{\Omega_Y \xi}(t) = 1) \wedge P(\Pi_{\Omega_\Lambda \xi}(t) = 0) \right\} \right] \wedge \quad (7) \\ \wedge \left[\bigcap_{\Omega_\Phi} \max_{n, \bar{\mu}_\Sigma, \bar{T}_\Sigma} L_{\Omega_\Phi} \left(n, \bar{\mu}_\Sigma, \bar{T}_\Sigma; \Omega_\Phi / l, \bar{y}_{\rho\Sigma}, \bar{x}_{\rho\Sigma}, n_s, \bar{\mu}_{s\Sigma}, T_{s\Sigma} \right) \left\{ P(\Pi_{\Omega_\Phi \xi}(t) = 1) \vee P(\Pi_{\Omega_\Phi \xi}(t) = 0) \right\} \right] \longrightarrow n^*.$$

Аналізу виразу свідчить, що в якості опорного виміру при ототожненні вимірів від джерел не завжди слід обирати вимір від найбільш високоточного джерела.

Для ситуацій радіолокаційного спостереження, представлених пп. 1. б) і 1. в), в якості опорного при ототожненні доцільно вибрати вимір від джерела з меншою зоною огляду, навіть якщо він має гірші точнісні характеристики.

Наприклад, коли таке джерело закриває провали у великих за розміром зонах огляду інших, більш високоточних джерел, це дозволяє підвищити якість отримуваних оцінок кількості ПО, що знаходяться в радіолокаційному полі сукупності різнотипних джерел радіолокаційної інформації.

Висновки і напрямки подальших досліджень

Запропонований метод сумісної обробки координатної та ознакової інформації в системах об-

робки радіолокаційної інформації спеціального призначення, що дозволяє врахувати інформаційні можливості різнотипних джерел про параметри траєкторій, сигнальні, траєкторні та оперативно-тактичні ознаки, а також використовувати інтелектуальні технології для розпізнавання повітряних об'єктів дозволяє отримати оцінки кількості повітряних об'єктів і прийняти рішення про тотожність вимірів координатних і некоординатних параметрів повітряних об'єктів від різнотипних джерел радіолокаційної інформації.

При цьому враховуються особливості їх функціонування, що визначають відмінності в змісті інформації про координатні і некоординатні параметри повітряних об'єктів, які видаються для подальшої обробки в комплексах засобів автоматизації спеціального призначення.

Використання запропонованого методу сприяє забезпеченню вимог споживачів щодо оперативності та якості інформації про повітряну обстановку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КВЦ, 2000. – 428 с.
2. Бакут П.А., Жулина Ю.В., Иванчук Н.А. Обнаружение движущихся объектов. – М.: Сов. радио, 1980. – 287 с.
3. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
4. Войтович С. А. Метод об'єднання інформації про повітряні об'єкти від сукупності різнотипівих джерел / С.А. Войтович, С.Ю. Стасев, В.О. Корнєєв // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – № 4(16). – С. 54-58.
5. Грачев В.М., Довбня А.В. Метод и алгоритм мультирадарной траекторной обработки радиолокационной информации в системе независимых РЛС // Радиотехника. – 2006. – № 145. – С. 67-75.
6. Войтович С. А. Метод об'єднання інформації в системах обробки радіолокаційної інформації з врахуванням часу надходження даних від джерел / С.А. Войтович, С.Б. Клімов, С.Г. Шило // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 3(7). – С. 3-7.
7. Чалий В.В. Інтеграція різних джерел спостереження в системі контролю повітряного простору / Чалий В.В., Головняк Д.В., Калімулін Т.М., Місюк Г.В. // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – № 6(46). – С. 15-18.
8. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КВЦ, 2000. – 428 с.
9. K. Yang; Y. Bar-Shalom; P. The cross-covariance for heterogeneous track-to-track fusion - Willett Proc. Vol. 11018, Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVIII; 1101806 (2019) <https://doi.org/10.1117/12.2520001>
10. Автоматизация обработки, передачи и отображения радиолокационной информации / Под ред. В.Г. Корякова. – М.: Сов. радио, 1975. – 304 с.
11. Шило С.Г. Метод статистического синтеза алгоритмов комбинированного объединения и обобщения радиолокационной информации // Вісник МСУ. Технічні науки. – 2002. – Т. 5, № 7.-- С. 9-12.
12. Войтович С.А., Шило С.Г. Метод совместного объединения и обобщения информации о воздушной обстановке в системах обработки радиолокационной информации // Системи обробки інформації. – 2004. – Вип. 1. – С. 200-207.
13. Метод совместного объединения координатной и признаковой информации в системах обработки радиолокационной информации / С.А. Войтович, С.Г. Шило, А.В. Сисков, П.Г. Бердник, А.Н. Бесчасный // Системи обробки інформації. – 2005. – Вип. 3 (34). – С. 33-41.
14. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
15. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
16. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
17. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
18. Кучук, Г.А. Синтез стратифікованої інформаційної структури інтеграційної компоненти гетерогенної складової Єдиної АСУ Збройними Силами України / Г.А. Кучук, О.П. Давікоза // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: ХУ ПС, 2013. – № 3(12). – С. 154-158.
19. Кучук Г.А. Распределение каналов по трактам узла коммутации при адаптивной маршрутизации / Г.А. Кучук // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – № 26. – С. 167 – 172.
20. Грачев В.М., Довбня А.В. Метод и алгоритм мультирадарной траекторной обработки радиолокационной информации в системе независимых РЛС // Радиотехника. – 2006. – № 145. – С. 67-75.

Received (Надійшла) 12.11.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.12.2019

**Method of joint processing of coordinate and signal information
in systems of radio location information of special purpose**

S. Shylo, D. Golovnyak, S. Khmelevskiy, O. Timochko

Abstract. The **subject matter** of the article is the process of joint processing of coordinate and sign information in special purpose radar processing systems. The **goal** is to develop a method for the joint processing of coordinate and sign information in special purpose radar processing systems, which allows to take into account the information capabilities of various sources about the parameters of trajectories, signal, trajectory and tactical features, as well as to use intelligent technologies for the recognition of air objects. The **tasks** are: The initial prerequisites and the choice of the approach to the tertiary processing of radar information are considered. Results of researches on improvement of methods and algorithms of tertiary processing of radar information in the systems of processing of radar information of special purpose are presented. The method of joint processing of coordinate and sign information in systems of processing of radar information of special purpose is different, which differs from the known taking into account information possibilities of different sources about the parameters of trajectories, signal, trajectory and operative-tactical features, as well as the use of technological intelligence. aerial objects. The following **results** were obtained. The method of joint processing of coordinate and sign information in special purpose radar processing systems has been developed. **Conclusions.** The developed method should eliminate the disadvantages inherent in the existing methods and at the same time improve the quality of the information on the air situation. It is established that the use of the proposed method contributes to ensuring the requirements of consumers for the promptness and quality of information about the air situation.

Keywords: air objects, radar information sources, coordinate parameters, various characteristics, hypotheses of compatible identification of measurements, decisive rules.

A. Shyshatskyi¹, O. Sova², Yu. Zhuravskyi³, O. Nalapko¹, Yu. Sokil⁴, Yu. Ryndin⁵

¹ Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv

² Military institute of telecommunications and information named after Heroes of Krut, Kyiv, Ukraine

³ Zhytomyr Military Institute named after S. P. Korolev, Zhytomyr, Ukraine

⁴ Military unit A0661, Khmelnytskyi, Ukraine

⁵ Military Academy, Odesa, Ukraine

ANALYSIS OF APPROACHES OF INFLUENCE OF ELECTRONIC WARFARE MEANS ON THE ON THE NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEM

Abstract. The intensive development of information and control technologies, as well as their integration into a single information space, leads to an increase in the role of such technologies in the processes of control of troops (forces) and weapons, including high-precision ones. At the same time, the electronic material base of the information infrastructure created within the concept of network-centric warfare is potentially vulnerable to electronic warfare. In this article, the authors analyze the approaches to the influence of electronic warfare on network-centric control systems. In the course of the study, the authors solved the following interrelated tasks: identified information restrictions on the implementation of the network-centric war concept; the prospects for the development of electronic warfare systems that are focused on disruption of the operation of network-centric systems of military control and the prospective scientific and methodological approaches to substantiate the methods of radio-electronic influence on network-centric control systems. In the course of this research, the authors used the basic principles of electronic warfare theory, signal theory, communication theory, queuing systems and classical methods of scientific cognition - analysis and synthesis. According to the results of the study, the following conclusions can be drawn: perspective directions for the development of radio-electronic influences, oriented on the transport layer of communication networks, can be implemented as complexes of territorially distributed means of electronic control, implementing fundamentally new methods of suppression, and special software and bookmarks software (viruses) that are introduced into the telecommunications network equipment. It should be noted that the use of all the above radio-electronic effects is advisable only against packet networks with advanced topology. The use of such influences against networks with tree topology is pointless given the possibility of attaining the suppression effect of "classical" channel suppression.

Keywords: electronic warfare, use of tools, performance evaluation, open systems interaction model, telecommunication equipment.

Introduction

The intensive development of information and other advanced technologies, as well as their integration into the information and control systems of the armed forces of the leading countries of the world, the continuation of the implementation of the principles of "network-centric concept" of military and weapons control, become the most important factor that determines the course and outcome of modern armed struggle. At the same time, the radio-electronic material base of the "network-centric concept" information infrastructure of conducting a modern armed struggle is potentially vulnerable to the influence of radio-electronic suppression (RES) and it is a direct object of such influence [1-3].

Nowadays, significant progress has been achieved in the development of RES in leading countries of the world, which has increased the capabilities of the latter [4, 5].

The purpose of this research is to analyze approaches to the impact of electronic warfare on network-centric systems.

Presentation of the main material

1. Information restrictions on the implementation of the concept of network-centric war. Some experts point to the impossibility of collecting and analyzing the amount of information that is necessary to make an adequate network-centric war possible. Other

experts argue that the mass integration of forces and resources into a single network-centric environment can cause problems with information security [6, 7].

Most experts agree that technology can dictate its terms of military strategy and argue that over-reliance on high technology can present a new vulnerability that can be used by adversaries.

In addition, the following issues arise:

- on the compatibility of the information systems of the combined forces
- the availability of sufficient bandwidth of communication channels and computing resources to create an adequate information model of network-centric war;
- the possibility of managing large amounts of information during the course of the network of the central war.

The experience of using the concept of network-centered war in local wars has shown a number of its problematic aspects. The main ones include the following [8]:

- reassessment of a person's ability to adequately process of a large amount of conflicting information;
- insufficient consideration of the rapidity of the situation on the battlefield;
- a simplified vision of the enemy and, ultimately, his underestimation;
- excessive dependence on information;
- accelerating the process of combat management to such an extent that the speed of decision-making by a

person is a "weak link" in the process of commanding troops";

– the vulnerability of hardware and software in military systems to the impact of RES and IT weapons.

Nowadays, the practical implementation of technical solutions for the management of the network-centric war has led to the information overload of decision-makers.

Let's consider the features of combat in the network-centric war.

Acceleration of the process of combat management. Apologists for the concept of network-centered wars believe that information advantage will lead to decision-making advantages and allow parallel and continuous operations.

Excessive dependence on the information.

The value of vast information resources as a way of developing and conducting effective military operations can be overestimated, as well as the fact that the process of making important military decisions cannot be reduced to a thoughtful analysis of information. Several experts argue that discussions on the transformation of the armed forces are focused on the benefits of information and that the types of armed forces, national security and intelligence agencies have not properly examined the risks associated with the military doctrine that underlies the information.

The following problematic issues, which were identified during the practical application of these systems [1-18]:

– reliance on modern information systems can lead to unreasonable self-confidence of decision-makers;

– quantitative changes in information and its analysis very often lead to changes in the behavior of individuals and organizations, which sometimes leads to opposite results;

– a situation, which is characterized by a wealth of information and capabilities can change the value of the information, make it possible to review the goals of the military mission, and possibly increase the likelihood of making erroneous decisions.

The software is designed to process information, determination of the position of the enemy and their troops, a set of objectives, alarm, as well as to coordinate and control the actions of crews and unmanned combat vehicles on land, at sea and in the air.

For example, according to experts, to work a promising combat system of the ground forces will require 31 million lines of computer program codes [1, 2, 5, 18]. In addition, many combat systems that work with their own equipment will eventually be integrated into network systems. However, as the complexity of network system components increases, we will need to process information from systems whose capabilities and reliability are not always known.

In the article [6] it is emphasized that most often when there is a problem of compatibility in complex systems, there is a desire to achieve greater visibility, to expand the management from a single center and to set higher criteria. Not only are these ineffective, but they also increase the likelihood of technical crashes, user errors, and other downtimes. Normal technical failures

occur naturally in complex systems. At the same time, the frequency of failures increases in proportion to the number of information links in the system.

Insufficient consideration of poorly formalized factors in the psychological, cultural and religious spheres.

The experience of recent military conflicts clearly demonstrates that in the conduct of a network-centered war it is necessary to take into account many of those factors that cannot be explicitly registered by intelligence sensors and formalized in the framework of combat models.

Based on an analysis of the results of recent wars, RAND (Research and Development is US strategic research center) staff concluded that "... as remote devices become more sophisticated, there is a likelihood that a potential enemy will develop counter-technology and become more prepared in matters of protection organization, shelter equipment, fraud and application of RES systems. With all this in mind, the network effect will actually turn into a reduction in awareness and, ultimately, a reduction in situational awareness on the battlefield"[8].

2. Prospects for the development of RES systems, which are focused on the disruption of the operation of network-centered military control systems. The perspective approaches, which are presented in this section are based on the authors' scientific research on the substantiation of new approaches to radio-electronic influences, focused on disruption of the functioning of network-centric military control systems.

The basis of this material was based on the review work on the general military-applied principles of disruption of the functioning of network-centric systems of military control [10, 11], as well as work [11-21] with the theoretical substantiation of new methods and technologies of RES, which are oriented against the unified networks of communication the core of the network-centric environment.

Perspective approaches to influence network-centric control systems.

The main paradigm of warfare in the coming decades will be based on the concept of network-centered combat management based on the integration of functionally interconnected subsystems: information, sensory intelligence and combat, which is based on a single network-centric environment. The basis of such a control system is the information subsystem, which integrates the subsystems of intelligence and combat influence.

The analysis of the use of the network-centric principle of management reveals the main tendencies in changing the nature of the military confrontation between technically advanced states in the future [10-35]:

– the ever-growing threat of a pre-emptive complex strike by the enemy with fire and precision instruments coupled with information and radio-electronic influences on the information infrastructure;

– moving to the selective defeat of objects in the territory of the enemy of mainly critical infrastructure of

the country and its armed forces with the use of precision weapons;

- increasing the role of intelligence, operational disguise and protection of troops, the population and objects of the rear from promising means of destruction;

- the rapid nature of ground-to-air combat, dramatic changes in the situation and methods of action of troops;

- conducting information, psychological, camouflage (primarily misinformation) and other special operations to gain and maintain global information and psychological advantage;

- radio-electronic suppression of elements of control systems of troops and weapons, application of software and hardware, economic methods of combat, etc.;

- expanding the scope of space assets for intelligence, command and control of ground, air and naval forces;

- increasing the use of unmanned, robotic and remotely controlled weapons and warfare at all levels;

- expanding the scope of special forces for sabotage-terrorist and reconnaissance-sabotage operations in the deep rear of troops.

The main features of the system of armed struggle in the implementation of the network-centric principle of management will be the following [10]:

- the devices of armed struggle are information-rich and contain elements of networked information infrastructure;

- the duration of the decision cycle is reduced, there is a need to take into account additional factors in the management process, which requires an increase in information system throughput;

- making management decisions, which are based on automated support systems, which are based on information intelligent systems;

- hardware and software tools, that enable interaction within telecommunication networks, form a complex network global information infrastructure;

- elements of network infrastructure (devices of armed struggle, security, control and communication) consist of information and computing systems of various levels of complexity and organization.

At the same time, the network-centric control system will be vulnerable in the following areas [10]:

- destruction of information flows circulating between elements of the system;

- reducing the speed of information exchange between the elements of the system, which will dramatically increase the duration of the cycle “detection-identification-target-lesion” and to minimize the effectiveness of the network is the centric management principle;

- providing sufficiently massive and long-term disabling of network-forming tools.

Thus, in order to implement the aforementioned areas of destructive influence on network-centric control systems, it is necessary to take measures to improve and coordinate the actions of intelligence systems, complexes and devices of RES, communication, control and devices of defeat, to create a directional weapon

capable of disrupting the work of automated databases and local area networks, disable the main controls, communications and intelligence of the enemy.

Let us consider one of the promising areas of destructive influence on military control systems based on the network-centric principle, which is relatively easy to put into practice in the near term.

The network management information subsystem is made up of computing systems of varying complexity, which integrate communication networks into a single network-centric environment. One of the main features of the control system, which characterizes their ability to function on purpose, is the stability of the communication system.

Thus, reducing the stability of the communication system due to the integrated use of conventional and high-precision weapons, complexes and tools RES will violate the network management principle.

Modern control systems can be divided into three layers of a network-centric environment, which is formed by the communication system [11, 31]:

1. Physical layer (technical infrastructure of communication systems);

2. Semantic layer (data);

3. Syntax layer (data transfer protocols).

This approach allows us to identify the following impacts [10, 12]:

- effects on the physical layer, which is aimed at the real infrastructure of information and computer systems, data transmission systems and implying their physical destruction;

- effects on the semantic layer, which is related to the violation of the integrity and correctness of information;

- effects on the syntax layer, which is aimed at data corruption and violation of the logic of the systems.

Impacts on the semantic and syntactic layer appear to be simpler, more accessible and relatively easily implemented mechanisms than effects at the physical level using conventional and high-precision weapons.

In this regard, their development is receiving increasing attention. The modern approach to the influence on the semantic and syntactic layers of the network-centric environment involves a complex balanced use of RES complexes and devices, while carrying out measures to protect their management systems and information resources [10].

In view of the insufficiently developed theoretical framework for such actions, the simplest, most expedient way of influencing RES on the radio communication network within the communication system is to simplify their stability in the interests of disturbing the syntactic layer of the network-centric environment of the enemy [10].

However, an analysis of the use of existing “traditional” tactics of suppression and the use of complexes and tools of RES showed that they are not effective enough while using the enemy network-centric management principle.

In the hierarchical control system, when the impact of the RES devices at any level of the hierarchical control system, the passage of information to the

affected tool is blocked and, as a consequence, the non-fulfillment of a combat task by him [10].

Thus, the forms and methods of application of RES complexes and facilities developed prior to the emergence of the network-centric control concept will be ineffective against armed formations operated through a single network-centric environment. In such a system, it is almost impossible to completely block information and control channels.

In order to disrupt such a system, it is necessary to exclude all channels of control and transmission of information or to disable all technical or military devices. In fact, the effect can be achieved if a significant segment is blocked in the system or the transmission of information on any channels in a certain area or zone is excluded. The solution of this problem requires the development of new complexes and tools of RES and, accordingly, new forms and methods of their application [10].

Summarizing the above, we can make the following conclusions [10]:

- the existing approach to the impact of RES on individual elements of the communication system as the basis of a network-centric environment is ineffective;

- by influencing the information infrastructure of a network-centered military control system, the technical basis of which is communication systems and automatic control systems, it is possible to achieve a significant effect of the defeat of this system.

The influence of the territorially distributed heterogeneous grouping of RES will allow you to realize the following of the main directions of counteraction to the control systems, which are constructed in accordance with the network center principle, which was formulated earlier [10]:

- destruction of information flows, which are transmitted in a network-centric environment;

- reducing the speed of information exchange between elements of the network-centric system;

- providing sufficiently massive and long-term disabling of network-forming tools.

The researches, which are presented in the works [11-21] show that the most effective for destructive impact on network-centered military control systems will be the defeat of the space segment of the information subsystem, which, on the one hand, performs global information security functions, and on the other is built on the base of the radio communications and consequently vulnerable to the RES use.

Reducing the quality of space grouping will lead to multiple problems in the performance of the information subsystem, as well as in the application of many types of weapons and military equipment, since it is the space segment, including space systems intelligence, communications, navigation, topo-geodetic and meteorological, the information and control circuit that underlies the architecture of the global information subsystem.

In this case, the implementation of the defeat of various components of such information and control circuit will lead to the impossibility of each of the

systems to provide the performance of all or part of its inherent functions. In particular, we can distinguish [10]:

- in space exploration, the inability to transmit, with due time, messages on object detection, targeting and operational control of impact results, as well as data for determining the devices of the used impact;

- in space communication systems, the inability to provide, with specified quality, the transmission of combat command messages, to exchange data between military formations and governing bodies, including the prompt transfer to data control points for the preparation of strikes, and their result;

- in space topo-geodetic systems, the inability to transmit communications to ensure that military authorities of all levels have reliable topographic and geodetic data with given timeliness, to provide troops with special maps and photo documents of the terrain, as well as to prevent access to digital information arrays in the interests of targeting systems;

- in space radio navigation systems, the suppression will result in the failure of the radio navigation systems and, accordingly, the impossibility of creating navigation fields used in determining the location of military formations, combat and other equipment, shocks and devices of destruction.

Thus, taking into account the specifics of the modern transition to the implementation of the network-centric principle of management, it is interesting to use the existing REF complexes and facilities as a basis for defeating such a system of military control.

3. Prospective scientific and methodological approaches to the substantiation of methods of radio-electronic influence on network-centric control systems.

Based on the above arguments, it is possible to formulate a number of approaches to the technological implementation of the destructive impact on communication systems that form the network-centric environment of the network-centered control system.

Given the specifics of the modern transition to the implementation of the network-centric control principle, it is interesting to use radio-electronic influences based on the development of forms and methods of using existing RES complexes and facilities as a basis for the defeat of such a system of military control [10, 11].

Until recently, most of the work on RES was devoted to solve the problems of suppressing individual lines of communication, that is, suppressing at the physical level the model of interaction of open systems OSI (Open Systems Interconnection).

There are some researches, which are dedicated to the suppression of the radio networks, considering their structure, logic and the value of the transmitted information. However, by analyzing the possibilities of using “traditional” RES facilities, we can conclude that their impact is possible on other objects of the transport subsystem of the OSI model (physical, channel, network and transport levels).

Physical-electronic impact objects have traditionally been radio-electronic means and communication channels. At the link layer, such objects

include multiple access channels for the formation of separate networks (for example, based on TDMA, ALOHA, DVB-RSC).

Objects of electronic effects on the OSI network layer include components, transport channels of the combined network connection, routing and signaling protocols to ensure their functioning.

At the transport level, the objects of influence should include protocols and firmware to ensure the quality of service of the transmitted information flows over the integrated communications network.

The impact of RESs leads to various negative effects at different levels of OSI, the main ones of which are presented in Fig. 1.

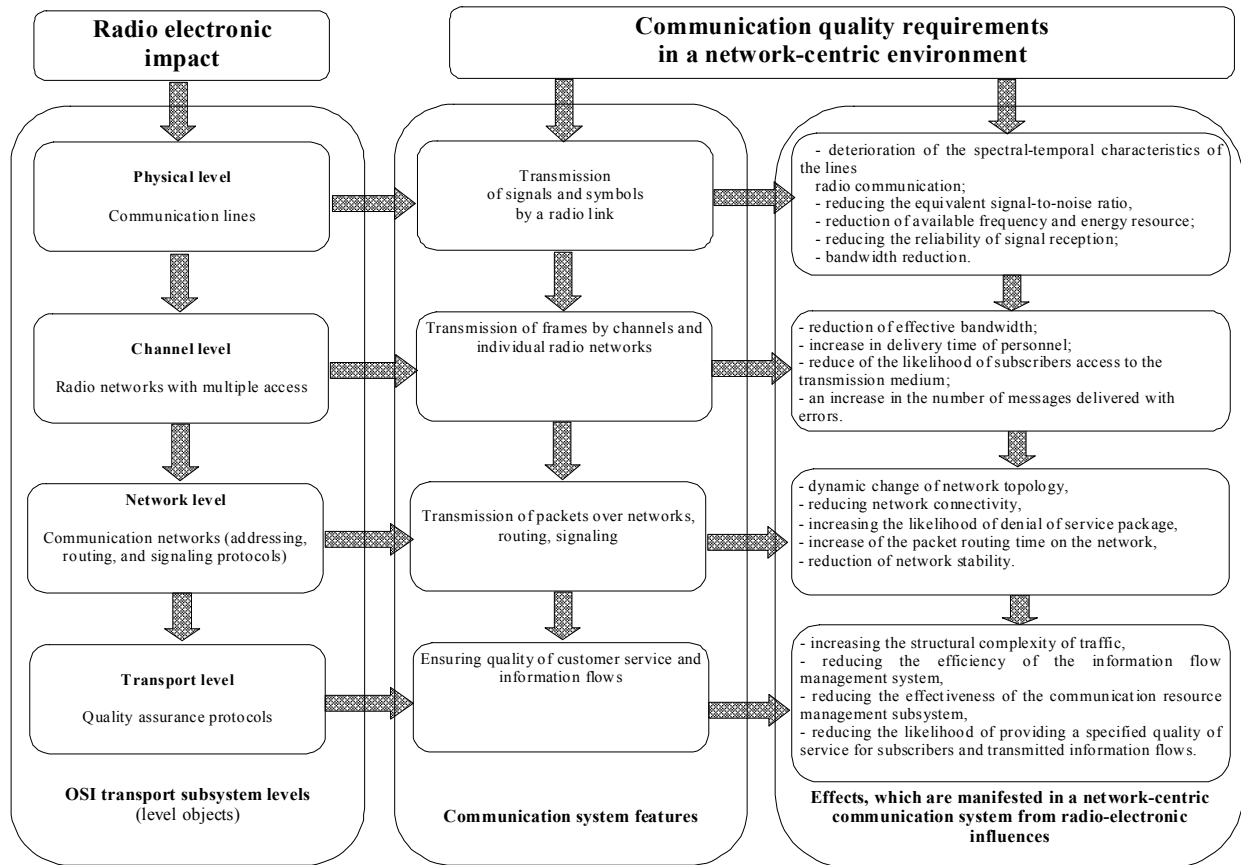


Fig. 1. The main negative effects that can cause radio-electronic effects at different levels of the transport subsystem of the OSI model [10, 11]

In this case, the direct object of influence will be the individual radio lines and radio networks operating within the integrated communications networks. Thus, promising ways to suppress integrated communications networks will use the effects of the destructive effects of radio-electronic influences on the physical layer as a basis for the formation of suppression effects at the higher levels of the OSI channel, network and transport models [10] (Fig. 2).

Currently, to solve the problems of ensuring the quality of service of telecommunication networks, numerous researches are conducted on the effectiveness of functioning of communication networks and switching devices of different levels in terms of transferring traffic of complex structure (presence of self-similar properties, non-poisson distribution of the time of packet arrival, etc.), as well as routing information flows in networks with dynamically variable topology.

Researches on this topic indicate a significant reduction in the speed and efficiency of servicing these information flows when transmitting them over networks with dynamically variable topology. It is

proposed to use the available results of these studies in the field of evaluation of the quality of service of telecommunication networks for the development of new solutions for the organization of radio-electronic suppression of network-centric systems [10].

At the same time, these data allow us to organize new interferences at the physical level, which, on the one hand, are not determined by existing means of protection, and on the other are focused on reducing the efficiency of the network and transport layer functioning, because they cause a number of negative effects at these levels [10].

Let's look at some of the promising areas for developing electronic effects that are focused on suppressing unified communications by taking into account the features of protocols on the OSI channel, network, and transport levels.

The main feature of the effects considered the accounting for the impact of interference, which allows us to consider dynamic transient and transient modes in the objects of suppression, as well as functional dependencies between protocols at different levels of the OSI model.

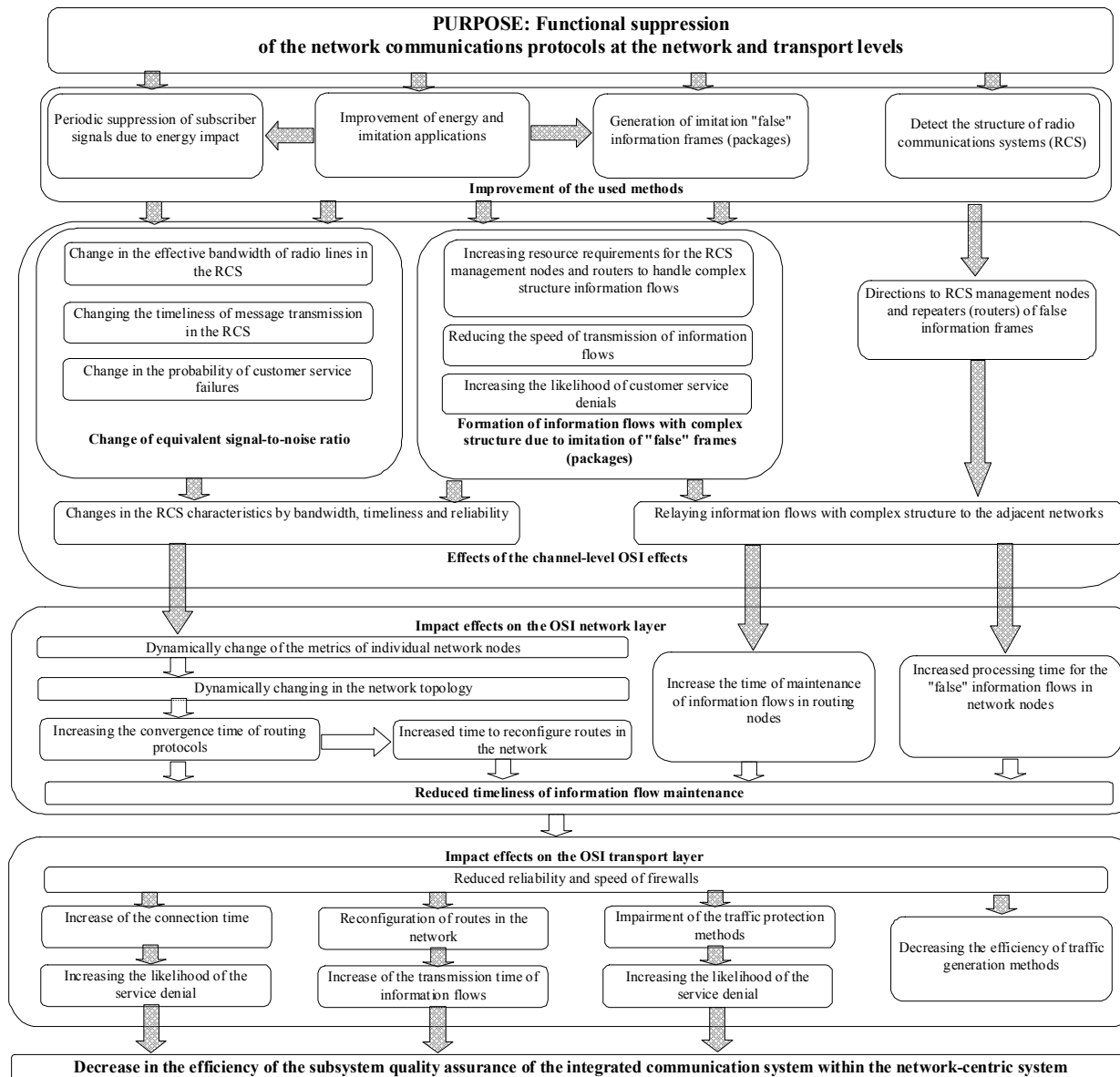


Fig. 2. Radio-electronic effects, which are oriented on the functional suppression of the networking protocols of the network-centered control system

Let's consider the main types of influences that can be applied to network-centric systems.

1. Radio-electronic influences, which are aimed at suppressing individual multiple access networks.

The researches of the possibilities of radio-electronic influences on suppression of communication protocols at the link layer, which are presented in the works [11-21], have shown the following.

It is known that packet radio networks that use a common multiple random access (MRA) channel to transmit packets have inherent instability. Such radio networks require correction during a long time of continuous operation. Thus, it is possible to implement a radio-electronic effect aimed at suppressing a radio network based on a common radio channel with a random MRA by periodically interfering with deliberate interferences and by using the specific properties of the random access method. This approach for suppression of the radio network was firstly proposed in the works

[10, 11] for the networks based on the CSMA/CA and S-Aloha protocols.

The process of servicing packets in these radio networks with a random MRA was presented as a Markovian process of death-reproduction, in which the intensity of packet service is determined by the bandwidth, which, in turn, depends on the current value of the signal/interference ratio.

The simulation showed that the dynamic intermittent interference of the interference on the common channel of such radio networks leads to their demolition to their blocked status even after the removal of radio-electronic influence. In this case, the suppression effect can be achieved without the complete suppression of the channel of the MRA, and by partial reduction of its throughput, within 10-20%.

This method of radio-electronic exposure, focused on the channel layer OSI, can be implemented by "traditional" RES by introducing a dynamic interference

mode, the time parameters of which are consistent with the parameters of the protocol random MRA, which is used in the radio network [10, 11].

Modern communication systems are built on the basis of MIMO technologies, in which several ways can be selected for sending messages to the addressee.

In the future, the above-mentioned field of development of radio-electronic influences was developed in the form of a multi-channel queuing system with the interlocking of individual channels, modeling the MIMO communication system, which is presented in the work [18]. Periodic impact in the form of suppression of individual radio channels in a multi-channel communication system leads to a significant decrease in the quality of service of such a system and ultimately to the overloading of the system with packets and its transition to a blocked status.

The simulation performed in the work [18] showed that when the system lock criterion is fulfilled, its throughput decreases from 100% to 70%, and the service time in a multichannel radio system increases by 10-20 times relative to the level corresponding to its normal functioning.

Thus, dynamic radio-electronic influences make it possible to translate the radio network into a non-stationary mode of operation, increase the duration and depth of transients in them. Increasing the intensity of influences allows the radio networks to be locked in as a result of a decrease in the intensity of the incoming packet inflow below the critical values.

2. Radio-electronic effects, which is aimed at suppressing the integrated geographically distributed mixed communications networks.

The principle of interference with dynamically variable parameters for varying the bandwidth of channels in their working signal-to-noise ratio (to exclude the triggering of physical layer interference protection) was further developed for the development of radio-electronic influences aimed at suppressing interconnection networks features of the functioning of their protocols on the network layer of the OSI model.

In order to take into account the effects of dynamic radio-electronic impact at the network level, it was proposed to recalculate the quality of service of individual networks and radio communication channels in the network metric coefficients used by the respective protocols in solving network signaling and routing problems in it.

A mathematical model formalizing the estimation of network channel metrics in terms of dynamic interference with respect to DVB-S/S2 satellite channels is presented in the work [12]. The simulation for the DVB-S2 communication channel showed that a periodic change in the signal/interference ratio in the channel (upward and downward) leads to the issuance of channel metric change messages, which in turn lead to stopping the process of transferring and recalculating the network topology. The intensity of these messages is directly proportional to the frequency and depth of the signal-to-noise ratio and the time between individual messages can generally be approximated by an exponential distribution.

The analysis of the effects of suppression on adaptive-avalanche routing protocols (OSPF, IS-IS, EIGRP, etc.), which was carried out in the works [16-40], showed that such influence leads to an increase in the re-routing intensity of information flows and reducing the adequacy of routing tables.

The research of the process of functioning of the router with an adaptive-avalanche protocol (based on OSPF), is conducted in the work [13], showed that the probability of suppression of the communication network is determined by the intensity of failures of individual channels due to the interference, as well as by the parameter of the routing by the waiting time of the recovery time. Moreover, the size of the communication network practically does not affect the efficiency of its suppression.

There is a fundamental possibility of suppressing the communication network when it is exposed to a given intensity even on one radio channel in its composition.

In the article [22], to model the temporal parameters of radio-electronic impact, which is aimed at disrupting the operation of routing protocols without establishing a connection, a model of the functioning of the communication object in terms of communication channels failure in the form of a Markov process of transitions between the "channel failure" - "waiting for the connection recovery" - "router reconfiguration" states were developed.

The use of this model as a part of the technique of justifying the time parameters of radio-electronic influence on the routing protocol by the state of the channels (on the example of the OSPF protocol) allowed us to determine the most difficult operating conditions for this routing protocol. The simulation results show that when the time parameters of the impact and the routing protocol are agreed, the readiness of the individual router is reduced to 0.5. Due to the avalanche of adjacent message nodes changing the metrics of individual channels, each of the routers of the network reduces its availability by constantly recalculating the shortest paths. As a result, the effect of reducing stability applies to the whole network as a whole. At the same time, the network stability indicator is reduced to 0.4-0.2 by the "average network probability of information communication direction" indicator. In this case, the degree of network stability is proportional to the average length of the link.

In the article [20], to justify the temporal parameters of radio-electronic impact, which is aimed at disrupting the operation of routing protocols with connection, a model of functioning of the information direction of communication was developed, which takes into account not only the process of reconfiguration of individual routers due to the failure of channels, but also accounting for the structure connections, as well as the network approach, which is taken to backing up routes. The results of radio-impact effects simulations show that connection-based routing networks reduce their resilience by reducing the resilience of connections that pass through the affected nodes. In this case, the level of stability reduction is proportional to the number of

nodes that are affected. On the basis of this model, a technique for substantiating the time parameters of radio-electronic influence on the routing protocol with the establishment of connections was further developed, which allows to justify the time parameters of dynamic interference, which reduce the stability of the network to values below the required ones.

To confirm the adequacy of the developed scientific and methodological apparatus of substantiation of the methods of radio-electronic influence and practical confirmation of the effects of functional suppression of networks, experimental studies were conducted on the basis of the network with the OADV protocol (Ad hoc On-Demand Distance Vector), the results of which are presented in the article [19].

A comparison of the theoretical calculations and experimental data, which was obtained, makes it possible to conclude on practical confirmation of the possibility of such radio-electronic influences to perform effective functional suppression of networks.

The above-mentioned perspective directions for the development of radio-electronic influences, oriented on the network layer of the OSI model, can be implemented by territorially distributed "traditional" RES complexes due to the introduction of dynamic interference mode, the time parameters of which are consistent with the parameters of the routing protocol, which is used by the network.

Additionally, an analysis of the influence of cryptographic information security in the communication channels on the effectiveness of the considered electronic effects was conducted. This analysis has shown that the use of standard VPNs and packet-mode crypto-routers (which make up the vast majority of modern cryptographic protection solutions) is not a complication for such radio-electronic influences and allows them to maximize their functionality for suppressing both networks and individual information destinations.

3. Radio-electronic influences, which are aimed at disrupting the quality of service protocols in the integrated communications networks.

A promising area for the development of radio-electronic impacts, which were aimed at suppressing unified networks at the transport layer of the OSI model is the development of influences focused on traffic generation and disruption of service quality protocols.

Well, promising radio-electronic influences are the effects that are oriented to form a channel packet flow of a complex structure with a coefficient of variation that is greater than one and significantly different from the simplest.

The analysis of the results of modeling the processing of complex structure flows at the network switching nodes, which is presented in the articles [15-36] showed that the timeliness of processing such flows is ten times lower relative to the processing of the simplest flows. In this case, this effect is observed on high-voltage switches.

The first variant of such electronic influence is presented in the article [20] and it is based on the

introduction of additional simulation traffic, which allows to generate the output stream of packets from the channel due to the structure, which is significantly different from the simplest one (coefficient of variation is greater than one). A distinctive feature of this impact is the need to introduce additional packages, which are copies of previously transferred packages, which in some cases can lead to the "destruction" of the information flow. In addition, a number of protocols (such as IPSec) number packets within a data session, enabling them to detect implemented packets in traffic. This disadvantage is deprived of the second variant of radio-electronic influence, focused on the complete interception and transformation of the structure of information flow [21]. The evaluation of the results of these radio-electronic impacts, focused on the formation of a complex traffic structure, critical to delays, showed that the stability of the network is reduced by reducing the timeliness of traffic service at its nodes and the actual blocking of nodes that transmit complex traffic. These electronic effects are a variant of complex DOS attacks.

In addition, the effect of the effect is manifested in the fact that the generated information flows are transmitted further through the network, reducing the timeliness of processing in other nodes. In this way, radio-electronic impact data can suppress specific communication directions. At the same time, the level of network stability decrease under such influences is proportional to the number of modified information flows, their speed and the average length of the communication direction.

The conclusion from the article

Further promising development of the direction of creation of radio-electronic influences, focused on suppression of networks at the transport level, is the development of a complex of models reflecting the process of functioning of the Diff Serv model in ensuring the quality of service of subscribers and information flows, as well as technologies of traffic formation (traffic shaping) and technologies of parameter control and traffic policing in the conditions of directed destructive radio-electronic influences.

The presence of such models will allow us to substantiate a set of radio-electronic influences, focused on the functional suppression of modern network technologies of quality assurance of service.

Their application will not allow to provide the necessary values of indicators of the functioning of the unified communication network, namely - to reduce the probability of stability of the information direction of communication and to increase the probability of failure of service.

Perspective directions of development of radio-electronic influences, oriented on the transport layer of communication networks, can be implemented both by complexes of territorially distributed RESs, implementing new methods of suppression, and by hardware and software bookmarks and special software (viruses), which are implemented in the telecommunication equipment.

It should be noted that the use of all the above radio-electronic effects is impractical only against packet networks with advanced topology. The use of such effects against networks with tree topology is impractical, which is given the possibility of attaining the suppression effect of "classical" channel suppression.

Thus, one of the promising ways of counteracting a network-centric integrated command structure is to use the radio-electronic effects that are oriented on the syntactic layer of the network-centric environment and violate the availability of information resources of that environment by affecting the communication subsystem.

Prospective methods of radio-electronic interference suppression of the oriented networks can use the effects of destructive effects at the physical level as a basis for the formation of suppression effects at the channel, network and transport levels of the OSI model.

In this case, new at this stage of research, and sufficiently elaborated methods of radio-electronic influences, include the following:

– a method of radio-electronic impact at the channel level, which is focused on congestion of multiple access networks due to the dynamic change of the signal/interference ratio in the common radio channel;

– a channel-level radio-electronic impact method, which is aimed at congesting the multi-channel communication systems by periodically suppressing individual communication channels in such a system;

– a method of radio-electronic impact at the network level, which is aimed at reducing the efficiency of routing protocols in the network by periodically changing the bandwidth of individual communication channels, which leads to a dynamic change in the topology;

– a method of electronic influence at the transport level, which is aimed at reducing the effectiveness of quality assurance protocols in the network due to the directional formation of the complex structure of the transmitted traffic.

In general, the novelty of these methods of electronic influence is the use of "traditional interference" to generate and develop internal system conflicts in the communication system at the upper levels of its functioning. Specifically, interferences with dynamically changing parameters that lead to transient and non-stationary processes at the upper OSI levels are considered.

A new achieved effect is the suppression of the communications network as a whole, including the wired segment, by influencing radio channels as a kind of "radio-electronic impact entry point".

REFERENCES

1. Cebrowski, A. K. and Garstka J. J(1998). "Network-Centric Warfare: Its Origin and Future". U.S. Naval Institute Proceedings. Annapolis (Maryland).
2. Hersprin, D. R(2008). "Rumsfeld's Wars: The Arrogance of Power. Lawrence, Kans.": University Press of Kansas.
3. Intelligence and Electronic Warfare (IEW) System Fact Sheets. Fort Huachuca, Arizona: U.S. Army Intelligence Center, 1994. 39 p. available at : <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a390663.pdf> (last accessed november 25, 2019).
4. FY 2015 budget request funds Electronic Warfare Development. PE 0604270A: Electronic Warfare Development Army. U.S. Army, 2014. 31 p. available at : http://www.globalsecurity.org/military/library/budget/fy2015/army-peds/0604270a_5_pb_2015.pdf (last accessed november 25, 2019).
5. Electronic Warfare Planning and Management Tool (EWPMT). United States Army Acquisition Support Center. 2016. available at : <http://asc.army.mil/web/portfolio-item/iews-electronic-warfare-planning-and-management-tool-ewpmt/> (last accessed november 25, 2019).
6. JP 3-13.1. Electronic Warfare. US Joint Chiefs of Staff, 2007. 115 p.
7. Shyshatskiy, A.V., Bashkirov, O.M. and Kostina, O.M (2015). "Development of integrated systems and data for Armed Forces", Arms and military equipment, No 1(5), pp. 35-40. available at : <http://journals.uran.ua/index.php/2414-0651/issue/view/1%285%29%202015> (last accessed november 25, 2019).
8. Kalantaievska, S., Pievtsov, H., Kuvshynov, O., Shyshatskiy, A., Yarosh, S., Gatsenko, S., Zubrytskiy, H., Zhyvotovskiy, R., Petruk, S. and Zuiko, V. (2018). "Method of integral estimation of channel state in the multiantenna radio communication systems.", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 5, No 9 (95): pp 60–76. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144085> (last accessed november 25, 2019).
9. Zhuk, O.G., Shyshatskiy, A.V., Zhuk, P.V. and Zhyvotovskiy, R.M (2017). "Methodological substances of management of the radio-resource managing systems of military radio communication", Information Processing Systems, Vol. 5(151), pp. 16-25. <https://doi.org/10.30748/soi.2017.151.02> (last accessed november 25, 2019).
10. Kuvshinov, O.V., Shyshatskiy, A.V., Lyutov, V.V and Zhuk, O.G(2017). "Analysis of ways for increasing the secrecy of broadband radiocommunication systems " Scientific works of Kharkiv National University of Air Forces, No. 1(50), pp. 24-28.
11. Popov, A.O. and Tverdokhlibov, V.V(2014). "General tendencies of development of means of electronic warfare ", Arms and military equipment, No. 4 (4), pp. 4-10.
12. Shyshatskiy, A., Kalantaievska, S., Malyk, O., Tiurnikov, M., Zhuk, P. and Pikul, R(2019). "Foundation the ways of radio electronic warfare devices development". Advanced information systems. No. 3(2). pp. 98-103.
13. Shyshatskiy, A., Yakhno, I., Malyk, O., Hatsenko, S. and Pikul, O(2019). "Method of assessment of information availability of radio inflammation sources by devices of radioelectronic recognition. Advanced information systems. 2019. No. 3(1). pp. 98-103.
14. Shyshatskiy, A., Hordiichuk, V., Sergienko, V., Mishchenko, A. and Pozdniakov, P(2019). "Analysis of technical characteristics of the radioelectronic intelligence of the Russian Federation". Системи управління, навігації та зв'язку No.1 (53). pp. 142-146. DOI: 10.26906/SUNZ.2019.1.142.

15. Shyshatskiy, A., Yakhno I., Malyk, O. and Hatsenko, S(2019). "Foundation of the factors affecting the planning and management of the radioelectronic developmen". Системи управління, навігації та зв'язку No.1 (53). pp. 162-167. DOI: 10.26906/SUNZ.2019.1.162.
16. Kopylov, A. V(2011). "On the weaknesses of the American concept of "network-centric wars (operations)"". Military thought. No. 7. pp. 53-62.
17. Sidorin, A. N. Prishchepov, V. M. and Akulenko, V. P(2013). "The US Armed Forces in the 21st Century: Military Theoretical Labor". Moscow : Kuchkovo field; War book, 800 p.
18. Makarenko, S. I(2016). "Radio-electronic informational effects on communication networks of a network-centric control system". Bulletin of the Air Force Academy. No. 3 (27). pp. 108-117.
19. Antonovich, P.I., Makarenko, S.I., Mikhailov, R.L. and Ushanev, K.V(2014). "Promising methods of destructive impact on military control systems in a single information space. Bulletin of the Academy of Military Sciences. No. 3 (48). pp. 93-101. — available at : [http://www.avnrf.ru/attachments/article/669/AVN-3\(48\)_001-184.pdf](http://www.avnrf.ru/attachments/article/669/AVN-3(48)_001-184.pdf) (last accessed November 25, 2019).
20. Makarenko, S.I(2012). "Evaluation of the quality of service of a packet radio network in an unsteady mode under the influence of external destabilizing factors". Journal of Radio Electronics. No. 6. p.2. — available at : <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (last accessed November 25, 2019).
21. Makarenko, S.I(2011). "Suppression of packet radio networks with random multiple access due to destabilization of their state". Journal of Radio Electronics. No 9. p. 2. available at : <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (last accessed November 25, 2019).
22. Makarenko, S. I., Mikhailov, R. L. and Novikov, E. A(2014). "Research of channel and network parameters of a communication channel in a dynamically changing signal-noise situation". Journal of Radioelectronics. No. 10.— available at : <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (last accessed November 25, 2019).
23. Makarenko, S. I. and Mikhailov, R. L(2016). "Information conflicts - analysis of work and research methodology". Management, communication and security systems. No 3. pp. 95-178. — available at : <http://scs.intelgr.com/archive/2016-03/04-Makarenko.pdf> (last accessed November 25, 2019).
24. Makarenko, S. I., Afanasyev, O. V., Baranov, I. A. and Samofalov, D. V(2016). "Experimental studies of the reaction of the communication network and the effects of rerouting information flows under dynamic changes in the signal-noise situation" Journal of Radio Electronics. No. 4.— available at : <http://jre.cplire.ru/jre/apr16/4/text.pdf> . (last accessed November 25, 2019).
25. Mikhailov, R. L. and Makarenko, S. I(2013). "Assessment of the stability of a communication network under the influence of destabilizing factors on it". Radio engineering and telecommunication systems. No.4. pp. 69-79.
26. Makarenko, S. I(2015). "Time of convergence of routing protocols in case of network failures". Management, communication and security systems. Np. 2. pp. 45-98. — available at : <http://scs.intelgr.com/archive/2015-02/03-Makarenko.pdf> (last accessed November 25, 2019).
27. Makarenko, S.I. and Mikhailov, R.L. "Adaptation of signaling parameters in the routing protocol with the establishment of connections under the influence of destabilizing factors on the network". Control, communication and security systems. 2015. No. 1. pp. 98-126. — available at : <http://scs.intelgr.com/archive/2015-01/07-Makarenko.pdf> (last accessed November 25, 2019).
28. Makarenko, S. I(2015). "A dynamic model of a communication system under the conditions of a functionally multilevel information conflict of observation and suppression". Control, Communication and Security Systems. No. 3. pp. 122-185. — available at : <http://journals.intelgr.com/scs/archive/2015-03/07-Makarenko.pdf> (last accessed November 25, 2019).
29. Makarenko, S. I(2014). "Intentional formation of the information flow of a complex structure due to the introduction of additional simulation traffic into the communication system." Cybersecurity issues. No. 3 (4). pp. 7-13.
30. Makarenko, S. I., Korovin, V. Mand Ushanev, K. V(2016). "Traffic conversion operator for deliberately increasing the structural complexity of information flows". Control, Communication and Security Systems. No 4. pp. 77-109. — available at : <http://scs.intelgr.com/archive/2016-04/04-Makarenko.pdf> (last accessed November 25, 2019).
31. Makarenko, S. I., Ryumshin, K. Yu. and Mikhailov, R. L(2014). "A model of the functioning of a communication network object in conditions of limited reliability of communication channels". Information Systems and Technologies. No. 6 (86). pp. 139-147.
32. Shyshatskiy, A., Zhuravskiy Yu., Kuvshinov, O., Hurskiy, T., Vozniak, R., Pikul, R. and Pikul, O(2019). "Vector-space approach to evaluation of the efficiency of use of radioelectronic controls". Advanced information systems. No 3(3). pp. 68-75. DOI: 10.20998/2522-9052.2019.3.10.
33. Gurskiy, T. G., Zhuk, O. G., Krivenko, O. V. and Shyshatskiy, A. V(2016). "Directions of improvement of facilities of radio communication with pseudorandom reconstruction of the working frequency. Collection of scientific works of MITI. No. 1. pp. 25-34.) available at: http://www.viti.edu.ua/index.php?view=coll_2016_1 (last accessed November 25, 2019).
34. Shyshatskiy, A.V., Lutov V. V. and Zhuk, O. G(2015). "Analysis of ways of increasing the efficiency of radio communication systems with orthogonal frequency multiplexing". Scientific and technical journal "Arms and military equipment.". – K.: CSIAM AF of Ukraine. No. 4(8) p.22-26: available at : http://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt_2015_4_5. (last accessed November 25, 2019).
35. Shyshatskiy, A. V., Olshanskiy, V. V. and Zhyvotovskiy, R. M(2016). "Algorithm of the choosing working frequencies for facilities of military radio communication in the conditions of intentional interference". Systems of armament and military equipment. No. 2. - P. 62-66. available at: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/16881> (last accessed November 25, 2019).
36. Shyshatskiy, A.V. and Zhuk, P.V. (2017) "Perspective of signal-code designs for wireless communication systems of the standard 5G. Scientific-practical conference "Priority directions of development of telecommunication systems and networks of special purpose". Application of subdivisions, complexes, communication facilities and automation in ATO" 9 – 10 november 2017 year (Reports and abstracts), Kyiv: MITI, pp.269-270. available at: http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2017/1/c_2017_1.pdf (last accessed November 25, 2019).

37. Romanenko, I. O., Shyshatskiy, A.V., Zhyvotovskiy, R. M. and Petruk, S.M (2017). "The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems". Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. No 1. pp. 97-100.
38. Romanenko, I. O., Zhyvotovskiy, R. M., Petruk, S.M., Shyshatskiy, A.V. and Voloshin, O.O (2017). "Mathematical model of load distribution in special purpose telecommunication networks". Information processing systems. No.3. p. 61-71.
39. Shyshatskiy, A.V.(2017). "The technique of choosing operating frequencies in a complex electromagnetic environment. Management", Navigation and Communication Systems Collection of Scientific Papers of the Yuri Kondratyuk National Technical University. No. 1(41).pp. 146-149.
40. Zhuravskiy, Y.V. and Kirilluk, V.A(2015). "The suppression factor of radio communication systems with pseudorandom frequency change.Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems: coll. Sciences. wash. - Zhytomyr : ZVY, Issue. 10, pp. 141-147.
41. Zhuravskiy, Y.V. Zhovnovatyuk, R.M., Nosova, G.D. and Zavada, A.A(2015). "Analysis of the influence of radio-masking measures on intelligence protection of electronic means". Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems. - Zhytomyr: ZVY. Issue. 10. pp. 43–50.
42. Sova O.Ya., Romanuk, V.A. Zuk, P.V. and Umanec, Ya. L(2012). "Synthesis methodology of smart nodes management systems of perspective mobile radio networks with dynamic topology". Collection of scientific works of HUPS. No 3. pp. 51 – 60.
43. Salnik, S.V., Salnik, V.V., Sova, O. Ya. and Stampkovskaya, Ya.A (2016). "Model of invasion of mobile radio networks of the class MANET". Proceedings of Kharkiv National University of the Air Force. No.(46). pp. 79-84.
44. Sova, O. Ya(2015). "An intelligent model for ensuring the radio connectivity of MANET mobile network nodes". Weapons systems and military equipment. No. 2(42). pp. 134-151.
45. Salnik, S.V., Salnik, V.V., Simonenko, O.A. and Sova, O. Ya(2015). "A method for detecting intrusions into mobile radio networks based on neural networks". Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. No. 4(21). pp. 82-90.
46. Sova, O. Ya., Minochkin, D.A., Romanyuk, V.A. and Zhuk, P.V(2015). "Model of organization of information resources of intelligent management systems of nodes of mobile radio networks of the class MANET". Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. No. 2(19). pp. 51-57.
47. Symonenko, O.A., Osurko, V.M., Minochkin, D.A. and Sova, O. Ya(2015). "Threats of secure transmission of information in mobile radio networks of the class MANET and methods of their elimination". Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. No. 1(18). pp. 109-113.
48. Sova, O. Ya., Romanyuk, V.A., Stampkovskaya, Ya.A. and Simonenko, O.A (2014). "Coordination of target functions of intelligent MANET tactical radio control systems". Proceedings of Kharkiv National University of the Air Force. No 3(40). pp. 85-92.
49. Simonenko, O.A., Sova, O. Ya., Romanyuk, V.A. and Umanec, Ya. L(2014). "Analysis of existing agent platforms for the construction of MANET nodes management systems for mobile radio networks". Information processing systems. No. 1(117). pp. 200-203.
50. Kravchuk, S.A., Minochkin, D.A. and Sova, O. Ya(2013). "Analysis of directions of increasing the efficiency of functioning of modern satellite communication systems". Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. No. 2(11). pp. 140-147.

Received (Надійшла) 24.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.11.2019

Аналіз підходів впливу засобів радіоелектронного подавлення на мережецентричну систему управління

A. В. Шишацький, О. Я. Сова, Ю. В. Журавський, О. Л. Налапко, Ю. М. Сокіл, Ю. І. Риндін

Анотація. Інтенсивний розвиток інформаційних та управляючих технологій, а також їх інтеграція в єдиний інформаційний простір приводить до підвищення ролі таких технологій у процесах управління військами (силами) та зброєю, у тому числі високоточною. Разом із тим, радіоелектронна матеріальна основа інформаційної інфраструктури, що створюється в рамках концепції мережецентричної війни, є потенційно уразливою для засобів радіоелектронної боротьби. В зазначеній статті авторами проведено аналіз підходів щодо впливу засобів радіоелектронної боротьби на мережецентричні системи управління. Авторами в ході проведення зазначеного дослідження вирішені наступні взаємопов'язані завдання: визначено інформаційні обмеження щодо реалізації концепції мережецентричної війни; визначено перспективи розвитку систем радіоелектронної боротьби, що орієнтовані на порушення функціонування мережецентричних систем військового управління та визначено перспективні науково-методичні підходи до обґрунтування способів радіоелектронного впливу на мережецентричні системи управління. В ході зазначеного дослідження авторами використані основні положення теорії радіоелектронної боротьби, теорії сигналів, теорії зв'язку, систем масового обслуговування та класичні методи наукового пізнання – аналізу та синтезу. За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки: перспективні напрямки розробки радіоелектронних впливів, орієнтованих на транспортний рівень мереж зв'язку, можуть бути реалізовані як комплексами територіально розподілених засобів радіоелектронної боротьби, що реалізують принципово нові способи подавлення, так і апаратно-програмними засобами і спеціальними програмними засобами (вірусами), які впроваджуються в телекомунікаційне обладнання мережі. Необхідно відзначити, що застосування всіх вищевказаних радіоелектронних впливів доцільно виключно проти пакетних мереж з розвинутою топологією. Застосування подібних впливів проти мереж з деревовидною топологією безглуздо зважаючи на можливість досягнення ефекту придушення "класичним" придушенням каналів.

Ключові слова: радіоелектронна боротьба, застосування засобів, оцінювання ефективності, модель взаємодії відкритих систем, телекомунікаційне обладнання.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Артеменко А. М.	106	Кузнецов О. Л.	106	Собчук В. В.	84
Барабаш О. В.	38	Кучук Н. Г.	48	Сова О. Я.	129
Берднік П. Г.	15	Лазуренко Б. О.	111	Сокіл Ю. М.	129
Босько В. В.	58	Левченко Л. О.	102	Тарасенко Я. В.	92
Васюта К. С.	9	Лещинська І. О.	97	Тахьян К. А.	3
Галахов Є. М.	38	Лещинський В. О.	97	Тихенко О. М.	102
Глива В. А.	102	Маковейчук О. М.	54	Тімочко О. О.	123
Головняк Д. В.	123	Мелешко Є. В.	58	Топіха Б. В.	115
Дружинін Є. А.	20	Мигаль С. В.	115	Трубчанінова К. А.	111
Журавський Ю. В.	129	Мілевський С. В.	63	Федоров А. В.	3
Зайцева О.	33	Мілов О. В.	63	Форгач А.	33
Захарченко І. В.	15	Наконечний О. В.	71	Хмелевський С. І.	123
Зоц Ф. Ф.	3	Налапко О. Л.	129	Хох В. Д.	58
Карлов А. Д.	106	Одинокий І. Г.	28	Худов Г. В.	3
Кійко С. Г.	20	Панова О. В.	102	Чалий С. Ф.	97
Ковалевський С. М.	3	Петрушенко В. М.	106	Чопенко Д. А.	9
Коваленко О. В.	43	Погасій С. С.	63	Шефер В. О.	115
Колесник А. В.	15	Прохоров О. В.	20	Шефер О. В.	115
Колумбет В. П.	102	Риндін Ю. І.	129	Шило С. Г.	123
Кононов В. Б.	28	Седлячек П.	33	Шишацький А. В.	129
Кононова О. А.	28	Серков О. А.	111		
Костяк М. Ю.	63	Скакаліна О. В.	75		

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 6 (58)

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. Ільїна*

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

Підписано до друку 28.12.2019. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 17,5. Тираж 150 прим. Зам. 1228-19

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