

Національний університет
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

National University
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

СИСТЕМИ управління, навігації та зв'язку

Control, navigation and communication systems

Випуск 1 (71)

Issue 1 (71)

Щоквартальне видання

Засноване у 2007 році

У журналі відображені результати наукових досліджень з розробки та удосконалення систем управління, навігації та зв'язку у різних проблемних галузях.

Засновник і видавець:

Національний університет
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

Телефон:

+38 (050) 302-20-71

E-mail редколегії:

kuchuk_nina@ukr.net

Інформаційний сайт:

<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

Quarterly

Founded in 2007

Journal represent the research results on the development and improvement of control, navigation and communication systems in various areas

Founder and publisher:

National University
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

Phone:

+38 (050) 302-20-71

E-mail of the editorial board:

kuchuk_nina@ukr.net

Information site:

<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

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

*Журнал індексується міжнародними наукометричними базами: Index Copernicus (ICV = **82.05**),
General Impact Factor, Google Scholar, Academic Resource Index, Scientific Indexed Service*

Затверджений до друку Вченою Радою Національного університету

“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” (протокол від 17 березня 2023 року № 3).

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 24464-14404 ПР від 27.03.2020 р.

Включений до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії” до категорії Б – наказами МОН України від 17.03.2020 № 409 та від 09.02.2021 № 157

Полтава • 2023

Редакційна колегія

Головний редактор:

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

Заступники головного редактора:

НЕСТЕРЕНКО Катерина Сергіївна
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);
ШЕФЕР Олександр Віталійович
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*).

Члени редакційної колегії:

БЛАУНШТЕЙН Натан Олександрович
(*д-р техн. наук, проф., Ізраїль*);
БОГОМ'Я Володимир Іванович
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);
ВАРБАНЕЦЬ Роман Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Одеса, Україна*);
ВЕСОЛОВСЬКИЙ Кшиштоф
(*д-р техн. наук, проф., Польща*);
ГАВРИЛКО Євген Володимирович
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);
ГАШИМОВ Ельшан Гіяс огли
(*д-р наук, проф., Баку, Азербайджан*);
ГЛИВА Валентин Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);
ДАКІ Олена Анатоліївна
(*д-р техн. наук, доц., Ізмаїл, Україна*);
ЗАЩЕПКИНА Наталія Миколаївна
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);
КАСАТКІНА Наталія Вікторівна
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);
КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КОЛОМІЙЦЕВ Олексій Володимирович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КОРОБКО Богдан Олегович
(*д-р техн. наук, доц., Полтава, Україна*);
КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КУЧУК Георгій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ЛЕВЧЕНКО Лариса Олексіївна
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);
ЛУКОВА-ЧУЙКО Наталія Вікторівна
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);
ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович
(*д-р техн. наук, проф., Німеччина*);
ПИСАРЧУК Олексій Олександрович
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);
ПОДКОПАЄВ Сергій Вікторович
(*д-р техн. наук, проф., Покровськ, Україна*);
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
СТАНКУНАС Йонас
(*д-р техн. наук, проф., Вільнюс, Литва*);
ТИМОЦЬУК Олена Миколаївна
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);
ТРИСТАН Андрій Вікторович
(*д-р техн. наук, доц., Чернігів, Україна*);
ФРОЛОВ Євгеній Андрійович
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*);
ЧОРНИЙ Олексій Петрович
(*д-р техн. наук, проф., Кременчук, Україна*);

Відповідальний секретар:

КУЧУК Ніна Георгіївна
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Технічні секретарі:

ЗАХАРЧЕНКО Руслан Володимирович
(*канд. техн. наук, доц., Полтава, Україна*);
ПЕТРОВСЬКА Інна Юріївна
(*магістр комп. інж., Харків, Україна*).

Editorial board

Editor-in-Chief:

Viktor KOSENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*).

Associates editor:

Katerina NESTERENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
Oleksandr SHEFER
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*).

Editorial board members:

Nathan BLAUNSTEIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Israel*);
Volodymyr BOHOMYA
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
Roman VARBANETS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Odesa, Ukraine*);
Krzysztof WESOŁOWSKI
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poland*);
Yevhen HAVRILKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
Elshan Giyas oglu HASHIMOV
(*Dr. Sc., Prof., Baku, Azerbaijan*);
Valentyn GLYVA
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
Olena DAKI
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Izmail, Ukraine*);
Nataliia ZASHCHEPKINA
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);
Natalia KASATKINA
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);
Andriy KOVALENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Oleksii KOLOMIITSEV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Bohdan KOROBKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*);
Viktor KRASNOBAYEV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Heorhii KUCHUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Larysa LEVCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);
Natalia LUKOVA-CHUIKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);
Andryy LUNTOVSKYY
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Oleksii PYSARCHUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
Serhii PODKOPAIEV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Pokrovsk, Ukraine*);
Serhii SEMENOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Jonas STONKUNAS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Vilnius, Lithuania*);
Olena TYMOSHCHUK,
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
Andrii TRYSTAN
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Chernihiv, Ukraine*);
Yevhen FROLOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*);
Oleksii CHORNYI
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kremenchuk, Ukraine*).

Responsible secretary:

Nina KUCHUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Technical secretaries:

Ruslan ZAKHARCHENKO
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*);
Inna PETROVSKA
(*MSD of Comp. Eng., Kharkiv, Ukraine*).

З М І С Т

АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Бойко А. Д., Ярмак В. Л.</i> Метод управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання аварійним морським подіям і зниження можливих збитків від них у системі управління безпекою судноплавства	4
<i>Галінський Д. О., Куліш Р. В.</i> Метод моніторингу стану стаціонарних елементів об'єктів критичної інфраструктури безпілотними літальними апаратами з використанням динамічного програмування	10
<i>Денисенко М. А., Караман Д. Г., Зуєв А. О., Гунбін М. В.</i> Регулювання крену БПЛА із застосуванням прогнозуючої моделі	15
<i>Заліський М. Ю., Щербина О. А., Терещенко Л. Ю., Осінчук А. О., Жарова О. Б., Станко П. О.</i> Метод побудови тінювих зображень об'єктів контролю рентгенівських систем авіаційної безпеки	19
<i>Іваненко Ю. В., Ляшенко О. С., Філімончук Т. В.</i> Огляд методів керування безпілотними літальними апаратами ..	26
<i>Іващенко Г. С., Склярів А. С., Барковська О. Ю.</i> Гібридний метод рішення задачі маршрутизації транспорту з урахуванням додаткових обмежень	31
<i>Коломієць В. В.</i> Аналіз особливостей використання окулярів нічного бачення пілотом вертольоту та їх впливу на безпеку польотів	36
<i>Толкунова Ю. М.</i> Удосконалення системи візуального визначення та подолання перешкод для безпілотного літального апарату	40

УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Aloshyn S., Haitan O.</i> Neural network support for automation of object control with multifactorial input under conditions of uncertainty	46
<i>Vasiuta V., Danyleiko A., Vasiuta V.</i> Conceptual approaches of organizing processes of verification of software projects of critical information-controlled systems on the basis of requirements for their life cycle	51
<i>Дрючко О. Г., Соловійов В. В., Шефер О. В., Бунякіна Н. В., Бороздін М. К., Галай В. М., Кульчий О. М.</i> Перетворення в РЗЕ- і літій-вмісних системах нітратних прекурсорів у підготовчих процесах формування оксидних поліфункціональних матеріалів	60

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Baranenko R., Tyshchenko D., Franchuk T., Sokol H.</i> Information system for quality assurance of education	66
<i>Бовчалюк С. Я., Піскарьов О. М., Радченко С. С., Слабухо Д. О.</i> Визначення напрямків розвитку керуючих пристроїв з паралельною архітектурою на базі пліс	69
<i>Бойко В. В., Підгорний М. В.</i> Інформаційна технологія системних досліджень процесів керування безпечним рухом транспортних засобів	73
<i>Гавриленко С. Ю., Челак В. В.</i> Розробка методу ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі нечітких дерев рішень	78
<i>Golovko G., Kalynovych M.</i> Specifics of implementation of the asymmetric encryption algorithm on elliptic curves	84
<i>Іващенко Г. С., Пономарьов В. О., Холєв В. О.</i> Короткострокове прогнозування нестаціонарних часових рядів з використанням моделей MLP та LSTM	91
<i>Клець Д. С., Федорченко В. М.</i> Аналіз підходів до розв'язання задач розпізнавання образів з використанням штучного інтелекту	96
<i>Kovalenko A. A., Miroshnychenko R., Martynov A.</i> Distributed computing systems based on the use of Grid technologies	101
<i>Коваленко А. А., Ярошевич Р. О.</i> Моделювання процесу обробки транзакцій у середовищі тактильного інтернету ..	104
<i>Кривуля Г. Ф., Токарев В. В., Ільїна І. В., Кравець В. С.</i> Взаємодія між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system у фізичному неорганізованому середовищі	108
<i>Міхав В. В., Мелешко Є. В.</i> Метод роботи рекомендаційної системи у комп'ютерній мережі типу peer to peer	112
<i>Mozhaiev M., Peresichansky V., Roh V., Bellorin-Herrera O. M.</i> Method of analysis of quality indicators of computer network of information system of critical application	118
<i>Можєв О. О., Сухина Ф. Ф., Башилов В. С.</i> Метод виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів	122
<i>Otarov M., Korobskiy V., Nevliudova V.</i> Features of kinematics and control of multi-link manipulator robots	127
<i>Подорожняк А. О., Любченко Н. Ю., Петрукович Д. Є., Оніщенко Д. П.</i> Дослідження системи розпізнавання автомобільних номерів на RASPBERRY PI	134
<i>Пономаренко О. Є., Горбачов В. О.</i> Агрегація структурної моделі складних мережних систем	138
<i>Skakalina E., Kapiton A.</i> Identification and management of risks in the project management of the development of software products	145
<i>Філімончук Т. В., Колтун Ю. М., Климова І. М., Корнієнко Д. Ю.</i> Модель розподілу пулу завдань за обчислювальними ресурсами	150
<i>Янковський О. А., Партика С. О., Філіппов В. В.</i> Застосування комп'ютерних методів обробки зображень в експериментальній та клінічній медицині	155
<i>Yareshchenko V., Kosenko V.</i> Coding to reduce the energy of data movement	159

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Ченчева О. О., Сукач С. В., Петренко І. С., Карасєва Н. В.</i> Принцип побудови бально-модифікованої діаграми ісікави як сучасного інструментарію аналізу ризиків видобувних та механообробних підприємств	163
<i>Бондаренко Б. В., Кучук Г. А.</i> Метод взаємодії компонентів комп'ютерних систем при сповіщенні про надзвичайну ситуацію	167

ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

<i>Почерняєв В. М., Магомедова М. С., Сивкова Н. М.</i> Комутаційний фазообертач на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі	171
<i>Serkov A., Breslavets V., Breslavets Yu., Yakovenko I.</i> Influence of electromagnetic radiation on resistance of semiconductor devices	177

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	182
----------------------------------	-----

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 358.42:623.76 (477)

doi: 10.26906/SUNZ.2023.1.004

А. Д. Бойко, В. Л. Ярмак

Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного
Державного університету інфраструктури та технологій, Київ

МЕТОД УПРАВЛІННЯ НЕПРИЙНЯТНИМИ РИЗИКАМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ НА ЗАПОБІГАННЯ АВАРІЙНИМ МОРСЬКИМ ПОДІЯМ І ЗНИЖЕННЯ МОЖЛИВИХ ЗБИТКІВ ВІД НИХ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ СУДНОПЛАВСТВА

Анотація. В статті розглянуто метод управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання виникнення аварійних морських подій (дуже серйозних або серйозних аварій) і зниження потенційних збитків від них в системі управління безпекою судноплавства, в якому враховуються всі заходи щодо запобігання або зниження несприятливих ризиків виникнення аварійних морських подій з морським або річковим, що дозволяє забезпечити мінімальні витрати на запобігання ризикам виникнення аварійних морських подій і зниження потенційного збитку від них. Удосконалено математичну модель визначення узагальнених витрат, що знижують несприятливий ризик аварійної морської події, яка враховує дуже серйозні аварії та серйозні аварії, інтенсивність потоку аварійних морських подій, збитки, ймовірність запобігання подіям та дозволяє визначити цільовий рівень підвищення безпеки судноплавства за мінімальних сумарних витрат. При цьому виконано формальне представлення несприятливого ризику виникнення аварійних морських подій з урахуванням не тільки чинників, що впливають на безпеку судноплавства, але й очікуваного середнього збитку. Виконано формальне представлення запобігання аварійних морських подій з урахуванням основних чинників і впровадження заходів щодо зниження несприятливих ризиків аварійних морських подій. Виконано визначення несприятливого ризику аварійних морських подій з урахуванням їх запобігання (зниження).

Ключові слова: метод; ризик; аварійна морська подія; морський та річковий транспорт; ризик; збиток; ймовірність; чинник; система управління безпекою судноплавства.

Вступ

Постановка проблеми. Проблема управління ризиками у системі управління безпекою судноплавства (СУБС) на даний час є надзвичайно актуальною і невирішеною в повному обсязі. Аналіз стану аварійності морського та річкового флоту України за останні свідчить про те, що для зменшення потенційного збитку від аварійних морських подій (АМП) необхідне врахування та реалізація різноманітних заходів щодо запобігання або зниження ризиків виникнення цих подій у СУБС [1-5].

На безпеку при експлуатації засобів водного транспорту впливає множина різних факторів, часто негативних. Тому й наслідки від впливу таких факторів матимуть різний характер, часто – негативний. Очевидно, що у такій ситуації для досягнення певного рівня безпеки необхідно вкладати певні кошти та здійснювати чималі витрати на безпеку судноплавства. З іншого боку нестача вкладень у безпеку судноплавства є однією з головних причин виникнення АМП. Отже, виникає нетривіальне завдання щодо знаходження балансу між необхідним мінімумом обсягів вкладень на досягнення певного рівня безпеки судноплавства, з одного боку, та забезпеченням ефективності бізнесу судовласників, з іншого.

Таким чином, потребує розробки механізм визначення першочергових ризиків та найефективніших заходів щодо зниження рівня цих ризиків задля

забезпечення балансу між вкладеннями на безпеку судноплавства та досягненням прибутку судовласників.

Чинні інструкції і керівні документи вимагають від власників суден та різних організацій постійно підвищувати рівень безпеки судноплавства. Але даний процес безперервно стикається з обмеженими фінансовими ресурсами та постійно зростаючими вимогами щодо рівня безпеки плавання. Дані умови продиктували необхідність розрахунку конкретного рівня безпеки судноплавства, який буде оптимальним з точки зору економіки. Аналіз досліджень процесів управління ризиками у системі управління безпекою судноплавства дозволяє зробити висновок про те, що у рамках цих досліджень не враховується критерій мінімальних сумарних витрат при розробці заходів, що знижують ризики аварійних морських подій [6-10].

Таким чином, у теорії і практиці безпеки судноплавства виявилася невідповідність. З одного боку, підходи, що у теперішній час застосовуються до управління ризиками у системі управління безпекою судноплавства є певною мірою застарілими та мають обмежені можливості. З іншого боку, постійно зростаючі потреби і вимоги практики щодо зниження ризиків АМП ініціюють необхідність створення адекватних основ для підвищення безпеки судноплавства.

Це визначає необхідність вирішення актуального завдання щодо управління неприйнятними ри-

зиками для визначення витрат на запобігання АМП і зниження можливих збитків від них.

Мета статті. Удосконалення методу управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання АМП і зниження можливих збитків від них у СУБС.

Основний матеріал

Структурно метод управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання АМП і зниження можливих збитків від них у СУБС містить послідовне виконання основних процедур, представлених на рис. 1.



Рис. 1. Структура методу управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання АМП і зниження можливих збитків від них у СУБС

Розглянемо зміст відповідних етапів більш детально.

1. Процедура формування вхідних даних. Вхідними даними для методики розрахунку оптимальної

ймовірності є: тип морського або річкового судна, список чинників АМП, найменування заходів зі зниження неприйнятного ризику, їхня вартість, розмір очікуваного збитку від АМП, час функціонування водного транспорту, інтенсивності потоків АМП тощо.

2. Процедура розрахунку ймовірностей запобігання АМП $P(E)_{pr}$ (див. вираз (1)) від витрат на заходи, спрямовані на зниження неприйнятних ризиків реалізації АМП.

Для зниження неприйнятного ризику АМП у рамках системи управління безпекою судноплавства на МРТ впроваджуються відповідні заходи. При цьому заходи щодо зниження неприйнятного ризику АМП являють собою дію або сукупність дій, спрямованих на запобігання або зниження рівня неприйнятних ризиків АМП [11]. Заходи щодо зниження неприйнятного ризику характеризуються ймовірністю запобігання АМП $P(E)$, під якою розумітимемо відношення інтенсивності потоку подій певного с-го класу аварійних морських подій після впровадження заходів E до інтенсивності потоку цих подій, яка була до впровадження заходів:

$$P(E) = \frac{\lambda_E}{\lambda_{EME}}, \quad (1)$$

де λ_{EME} – вихідна інтенсивність потоку АМП до впровадження заходів щодо запобігання (зниження) неприйнятних ризиків; λ_E – інтенсивність потоку АМП з урахуванням запобіжних заходів.

Інтенсивності потоків відвернутих АМП є прогнозними величинами і розраховуються експертним методом. За кожним чинником F_i^n заходів E_s щодо запобігання (зниження) неприйнятного ризику може бути декілька. При цьому один захід може впливати на кілька чинників.

Умовні ймовірності формально задамо для кожного типу водного транспорту (морського чи річкового) окремо, де класи АМП, це дуже серйозної або серйозної аварії ($j = 1, 2$) у вигляді матриці. Її рядки являють собою заходи щодо запобігання АМП, а стовпчики – чинники АМП (матриця (2) з чинниками, що впливають на безпеку самого судна, матриця (3) з чинниками, що впливають на безпеку людини, матриця (4) з чинниками, що впливають на безпеку навколишнього середовища, матриця (5) з чинниками, що впливають на безпеку вантажу). На перетині рядків і стовпців знаходяться значення відповідних ймовірностей запобігання АМП

$$\begin{bmatrix} P(F_1^1|E_1) & \dots & P(F_5^1|E_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(F_1^1|E_S) & \dots & P(F_5^1|E_S) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} P(F_1^2|E_1) & \dots & P(F_4^2|E_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(F_1^2|E_S) & \dots & P(F_4^2|E_S) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P(F_1^3|E_1) & \dots & P(F_5^3|E_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(F_1^3|E_S) & \dots & P(F_5^3|E_S) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} P(F_1^4|E_1) & \dots & P(F_4^4|E_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(F_1^4|E_S) & \dots & P(F_4^4|E_S) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким чином, якщо заходів кілька (рис. 2), то результуюча ймовірність запобігання дорівнюватиме добутку ймовірностей запобігання подій за підсумками впровадження кожного заходу, що знижує ризик подій. Таким чином, результуюча ймовірність запобігання для АМП, що сталася з причини чинника F_i^n , представляється таким виразом

$$P(F_i^n|E)_{rez} = \prod_{s=1}^S P(F_i^n|E_s). \quad (6)$$

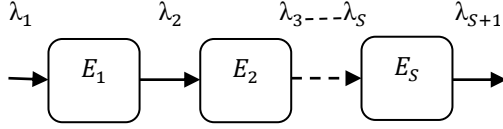


Рис. 2. Графічне представлення процесу запобігання аварійній морській події за підсумками впровадження кількох заходів

Якщо ймовірність запобігання аварійній морській події за результатами впровадження заходів щодо зниження неприйнятних ризиків АМП дорівнює нулю, то заходи є неефективними, і подія реалізується. Якщо ймовірність запобігання АМП за ре-

$$R_q' = \sum_{t=1}^{|C|} \left(\sum_{j=1}^J \lambda_j \left(T_f \left(\left[\sum_{i=1}^5 Y(F_i^1|EME_j^t) P(F_i^1|EME_j^t) \right] [1 - \prod_{i=1}^5 \prod_{s=1}^S P(F_i^1|E_s)] + \left[\sum_{i=1}^4 Y(F_i^2|EME_j^t) P(F_i^2|EME_j^t) \right] [1 - \prod_{i=1}^4 \prod_{s=1}^S P(F_i^2|E_s)] + \left[\sum_{i=1}^3 Y(F_i^3|EME_j^t) P(F_i^3|EME_j^t) \right] [1 - \prod_{i=1}^3 \prod_{s=1}^S P(F_i^3|E_s)] + \left[\sum_{i=1}^2 Y(F_i^4|EME_j^t) P(F_i^4|EME_j^t) \right] [1 - \prod_{i=1}^2 \prod_{s=1}^S P(F_i^4|E_s)] \right) \right). \quad (7)$$

Тоді скорочення несприятливого ризику реалізації АМП від впровадження запобіжного заходу можна представити як

$$\Delta R_q = R_q - R_q'. \quad (8)$$

$$\text{де } R_q = \sum_{t=1}^{|C|} \sum_{j=1}^J R_j^t = \sum_{t=1}^{|C|} \left(\sum_{j=1}^J \lambda_j \left(T_f \left(\sum_{i=1}^5 Y(F_i^1|EME_j^t) P(F_i^1|EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 Y(F_i^2|EME_j^t) P(F_i^2|EME_j^t) + \sum_{i=1}^3 Y(F_i^3|EME_j^t) P(F_i^3|EME_j^t) + \sum_{i=1}^2 Y(F_i^4|EME_j^t) P(F_i^4|EME_j^t) \right) \right) \right), q = \overline{1, Q}.$$

Вибір запобіжних заходів можна зробити на підставі принципу Парето (правило 80/20, принцип найменшого зусилля) [13]. Врахувати принцип Парето при моделюванні складних систем можна, якщо завдання на максимум відповідного функціоналу при заданих обмеженнях на використання ресурсів

$$\max_{j \in J} R = \max_{j \in J} \left[\sum_{t=1}^{|C|} \sum_{j=1}^J R_j^t = \sum_{t=1}^{|C|} \left(\sum_{j=1}^J \lambda_j \left(T_f \left(\sum_{i=1}^5 Y(F_i^1|EME_j^t) P(F_i^1|EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 Y(F_i^2|EME_j^t) P(F_i^2|EME_j^t) + \sum_{i=1}^3 Y(F_i^3|EME_j^t) P(F_i^3|EME_j^t) + \sum_{i=1}^2 Y(F_i^4|EME_j^t) P(F_i^4|EME_j^t) \right) \right) \right) \right]. \quad (9)$$

Таким чином, формалізовано підходи до розрахунку несприятливого ризику АМП, що враховують усі класи, інтенсивності, збитки, чинники (причини) подій і ймовірність запобігання за дискретного розподілу збитків. Ці формалізовані представлення необхідні для побудови математичної моделі визначення витрат на запобігання аварійним морським подіям і зниження можливих збитків від них у СУБС МРТ [14, 15].

Залежність імовірності запобігання аварійним морським подіям від витрат на заходи, що знижують несприятливий ризик АМП, визначається так:

$$P(EME)_{pr} = 1 - e^{-\frac{U}{V_0}}, \quad (10)$$

при $V_0 = 0, P(EME)_{pr} \rightarrow 0,$

при $V_0 = \infty, P(EME)_{pr} \rightarrow 1,$

де $P(EME)_{pr}$ – імовірність запобігання АМП; V_0 –

результатами впровадження заходів прагне до одиниці, то заходи є ефективними.

3. Перевірка граничних умов для виконання розрахунків з використанням виразів (14) і (16) в рамках побудови математичної моделі (7) – (18):

$$\begin{aligned} U_{EME}, Y_j, \lambda_j, T_f, V_0 &> 0, \\ 0 < P(F_i^n|E_s) &\leq 1, \\ 0 \leq P(EME)_{pr} &\leq 1. \end{aligned} \quad (19)$$

У відповідності до Положення про класифікацію, порядок розслідування та обліку АМП із суднами, під ризиком розуміються дії, не передбачені правилами, якими слід керуватися у визначеній несприятливій ситуації, усвідомлено розпочаті з метою запобігання або зменшення шкоди людям, судну або вантажу, яка може бути заподіяна їм, якщо в умовах конкретної небезпеки немає можливості діяти у відповідності з установленими правилами [12].

У разі впровадження заходів, спрямованих на запобігання (зниження) несприятливого ризику АМП, узагальнене значення несприятливого ризику для всіх відповідних подій становитиме

замінити завданнями на мінімум ресурсів при заданому (бажаному) значенні функціоналу. Безпосередньо в роботі для цього необхідно обчислити несприятливі ризики АМП, відсортувати і вибрати ті, які найефективніше вплинуть на зниження загально-го несприятливого ризику:

постійна процесу, що характеризує швидкість зміни процесу (підвищення безпеки судноплавства); U – витрати на забезпечення безпеки судноплавства.

За характеристику експоненціального процесу (зміна ймовірності запобігання залежно від витрат на забезпечення безпеки судноплавства) у роботі розглянуто постійну процесу, що визначає розмір вкладених коштів у забезпечення безпеки судноплавства. За підсумками цього процесу підвищення рівня безпеки, що визначається експонентою, досягає 95% рівня асимптоти ($P(EME)_{pr} \rightarrow 1$). Менше значення V_0 означає раціональне використання фінансових коштів і найбільшу ефективність СУБС морського та річкового транспорту. Постійна процесу визначається аналітично. При цьому зворотно витрати на заходи представляється як:

$$U = -V_0 \ln(1 - P(EME)_{pr}). \quad (11)$$

З метою забезпечення або підвищення безпеки судноплавства можуть розроблятися і застосовуватися різні заходи, спрямовані на усунення чинників, що безпосередньо впливають як на безпеку самого судна, так і на безпеку людини, довкілля і вантажу.

Безпосередньо формальне представлення витрат для всіх заходів може бути представлено у вигляді такого виразу (окремо для чинників n -го типу)

$$U_{EME} = -\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I V_{ois} \ln(1 - P(F_i^n | E_s)). \quad (12)$$

Зі збільшенням вкладень фінансових коштів у запобіжні заходи безпека судноплавства підвищуватиметься. Але водночас ефективність додаткових вкладень у заходи може бути нижчою, ніж у разі початкового вкладення до певного рівня $P(EME)_{pr\ opt}$. Важливо визначити таке значення $P(EME)_{pr\ opt}$, з якого ефективність вкладень буде знижуватися.

Використання економічного критерію при управлінні чинниками ризиків АМП визначається необхідністю дотримання балансу ресурсів для забезпечення безпеки судноплавства та організацію виробництва. Вирішення завдання знаходження розглянутого балансу між двома складовими можливе на підставі критерію мінімальних об'єднаних витрат, досягнення якого означає баланс розміру витрат на ліквідацію можливого збитку від АМП і на заходи, спрямовані на запобігання виникненню збитку. Відхилення від мінімальних узагальнених витрат може

$$V_{gen} = R'_q + U_{EME} = \sum_{t=1}^{Cl} \left(\sum_{j=1}^J \lambda_j \left(T_f \left(\sum_{i=1}^5 Y(F_i^1 | EME_j^t) P(F_i^1 | EME_j) \right) [1 - \prod_{i=1}^5 \prod_{s=1}^S P(F_i^1 | E_s)] + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\sum_{i=1}^4 Y(F_i^2 | EME_j^t) P(F_i^2 | EME_j) \right] [1 - \prod_{i=1}^4 \prod_{s=1}^S P(F_i^2 | E_s)] + \left[\sum_{i=1}^3 Y(F_i^3 | EME_j^t) P(F_i^3 | EME_j) \right] [1 - \prod_{i=1}^3 \prod_{s=1}^S P(F_i^3 | E_s)] + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\sum_{i=1}^4 Y(F_i^4 | EME_j^t) P(F_i^4 | EME_j) \right] [1 - \prod_{i=1}^4 \prod_{s=1}^S P(F_i^4 | E_s)] \right) \right) - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I V_{ois} \ln(1 - P(F_i^n | E_s)). \quad (14)$$

Вираз (14) являє собою математичну модель узагальнених витрат і лежить в основі методу управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання аварійним морським подіям і зниження можливих збитків від них в СУБС на підставі критерію мінімальних узагальнених витрат.

Математична модель узагальнених витрат і критерій мінімальних узагальнених витрат працюють за умови:

$$\begin{cases} R_q, R'_q > 0; \\ 0 < P(F_i^n | E_s) < 1. \end{cases} \quad (15)$$

При цьому точка екстремуму визначається виразом:

$$P(F_i^n | E_s)_{pr\ opt} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^I V_{ois}}{R_q}. \quad (16)$$

Вид екстремуму – мінімум відповідно до виразу:

$$\sum_{i=1}^I V_{ois} \frac{1}{(1 - P(F_i^n | E_s))^2} > 0. \quad (17)$$

У загальному випадку математична модель узагальнених витрат представляється як система таких функціоналів:

$$\Phi(SUF, SCF, GM, SUD) = const. \quad (18)$$

1. Множина неконтрольованих факторів (зовнішніх впливів) SUF (set of uncontrollable factors), які об'єктивно існують та впливають на процес моделювання:

$$SUF = \{N, \{EME_j^t\}, T_o, T_f, \{Y_j\}\},$$

означати необґрунтовані витрати або недостатність ресурсів, що виділяються на забезпечення безпеки судноплавства. Розв'язання цієї задачі передбачає досягнення таких результатів:

$$\begin{cases} R_q \rightarrow \min; \\ U_{EME} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (13)$$

При цьому пошук оптимального значення рівня безпеки судноплавства має бути виконаний з урахуванням параметра ефективності (у цьому разі ймовірності запобігання АМП), який характеризує рівень зниження неприйнятних ризиків АМП (ефективність заходів) і вартість заходів. Ймовірність запобігання АМП характеризує якість СУБС МРТ.

Певна пропорція між узагальненими витратами та ймовірністю запобігання забезпечуватиме найбільшу ефективність забезпечення безпеки судноплавства. З огляду на це, за параметр оптимізації прийнято $P(EME)_{pr\ opt}$, а за критерій оптимізації – мінімальні узагальнені витрати. Ймовірність запобігання аварійним морським подіям і мінімальні узагальнені витрати визначаються для кожного класу АМП. З цього встановлюється відповідна класифікація критеріїв мінімальних узагальнених витрат. За відомих формальних виразів вкладень у забезпечення безпеки судноплавства та несприятливого ризику реалізації АМП, узагальнені витрати визначатимуться таким виразом:

де N – кількість АМП, що відбулися за час спостереження; $\{EME_j^t\}$ – множина АМП; T_o – час спостереження аварійних морських подій (кількість років, протягом яких зафіксовано відповідну кількість АМП); T_f – час функціонування водного транспорту при безпосередньому виконанні переходу (одного рейсу); $\{Y_j\}$ – множина збитків, до яких приводять АМП.

2. Множина керованих (вхідних змінних) факторів SCF (set of controlled (input variables) factors), якими можливо управляти у ході процесу моделювання:

$$SCF = \{C, \{F_i^1\}, \dots, \{F_j^4\}, \{f_i^M\}, \{E_s\}\},$$

де $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ – множина класів АМП; $\{F_i^1\}, \dots, \{F_j^4\}$ – множина чинників (причин) АМП; $\{f_i^M\}$ – множина гладких монотонних функцій; $\{E_s\}$ – множина заходів щодо запобігання (зниження) неприйняттого ризику; $P(F_i^n | E_s)$ – ймовірність запобігання АМП за результатами впровадження заходу, що знижує ризик подій; $P(F_i^n | EME_j^t)$ – умовна ймовірність того, що подія сталася через деякий чинник.

3. Множина засобів для моделювання GM (get the model) – математичний апарат, апаратні та програмні засоби.

4. Множина вихідних даних SUD (set of output date):

$$SUD = \{R_j(F_i^n | EME_j^t), \bar{R}_j(F_i^n | EME_j^t), R_j^t, R_q, R'_q, U_{EME}, V_{gen}\},$$

де $R_j(F_i^n | EME_j^t)$ – математичне сподівання величини збитку від небажаної події; $\bar{R}_j(F_i^n | EME_j^t)$ – математичне сподівання неприйняттого ризику аварійних морських подій; R_j^t – математичне сподівання ризику аварійних морських подій EME_j^t за всіма чинниками й очікуваним середнім збитком; R_q – узагальнене значення несприятливого ризику для всіх відповідних подій до впровадження заходів; R'_q – узагальнене значення несприятливого ризику для всіх відповідних подій у разі впровадження заходів; U_{EME} – витрати на заходи; V_{gen} – узагальнені витрати на запобігання аварійних морських подій.

Схема узагальної математичної моделі представлена рис. 3.

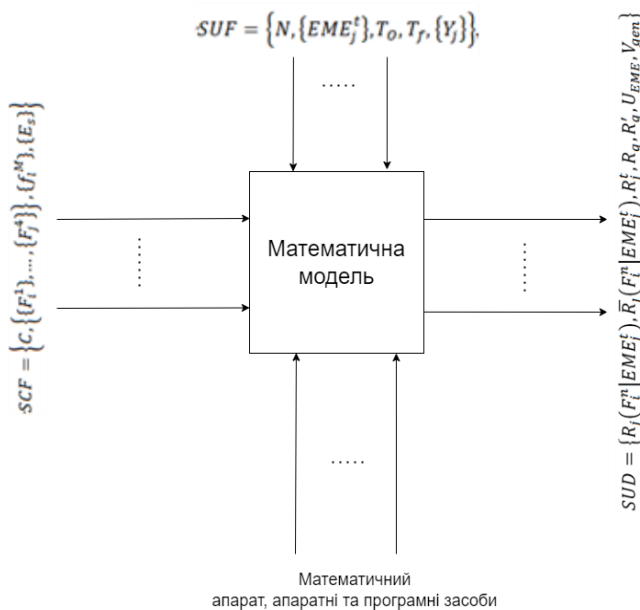


Рис. 3. Схема узагальної математичної моделі узагальнених витрат

Виходячи з оптимального рівня ймовірності запобігання аварійних морських подій для оптимізації витрат у системі управління безпекою судноплавства МРТ, необхідно з усіх наявних вибрати заходи щодо зниження неприйнятних ризиків АМП, виходячи з таких умов:

- максимальне скорочення неприйнятних ризиків аварійних морських подій;
- узагальнені витрати не повинні перевищувати мінімальні, розраховані з використанням математичної моделі узагальнених витрат.

Ця задача є задачею лінійного програмування [14].

Як обмеження приймаються узагальнені сумарні витрати при досягненні мінімального рівня ризиків. Математична постановка задачі визначається так:

$$\begin{cases} R'_q \rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^I V_{0is} \leq V_{min}, \\ V_{min} > 0. \end{cases} \quad (19)$$

За результатами розв'язання виразу (19) буде визначено оптимальний перелік заходів, що забезпечить підвищення безпеки судноплавства за мінімальних узагальнених витрат:

– Процедура визначення оптимальних ймовірностей запобігання аварійних морських подій $P(F_i^n | E_s)_{pr\ opt}$ (вираз (16)), узагальнених витрат V_{gen} (вираз (14)) та мінімальних витрат V_{min} , що відповідають оптимальній ймовірності запобігання АМП $P(F_i^n | E_s)_{pr\ opt}$.

– Процедура формування переліку заходів, що знижують ризик аварійних морських подій, вжиття яких забезпечує мінімальні узагальнені витрати та найбільше скорочення ризиків (вираз (18)).

– Формування звіту з вихідними даними, в якому містяться результати виконання четвертого і п'ятого етапів методу, а також додаткова інформація, необхідна для прийняття рішення з управління чинниками ризиків на підставі критерію мінімуму узагальнених витрат.

Враховуючі, що окремі чинники у системі управління безпекою судноплавства можуть змінюватися, а також можуть з'являтися нові чинники, необхідно проводити переоцінку та обробку ризиків у СУБС протягом усього життєвого циклу МРТ для своєчасного та ефективного визначення витрат на запобігання аварійних морських подій і зниження можливих збитків від них.

Висновки

Таким чином, в статті виконано формальне представлення несприятливого ризику виникнення аварійних морських подій з урахуванням не тільки чинників, що впливають на безпеку судноплавства, але й очікуваного середнього збитку. Виконано формальне представлення запобігання аварійних морських подій з урахуванням основних чинників і впровадження заходів щодо зниження несприятливих ризиків аварійних морських подій. Якщо ймовірність запобігання аварійних морських подій за результатами впровадження заходів щодо зниження несприятливих ризиків аварійних морських подій дорівнює нулю, то заходи є неефективними, і подія реалізується.

Якщо ймовірність запобігання аварійній морській події за результатами впровадження заходів прагне до одиниці, то заходи є ефективними. Виконано визначення несприятливого ризику аварійних морських подій з урахуванням їх запобігання (зниження).

При цьому формалізовано підходи до розрахунку несприятливого ризику аварійних морських подій, що враховують усі класи, інтенсивності, збитки, чинники (причини) подій і ймовірність запобігання при дискретному розподілі збитків.

Запропоновано математичну модель визначення узагальнених витрат, що знижують несприятливий ризик аварійної морської події, яка, на відміну від існуючих, враховує дуже серйозні аварії та серйозні аварії, інтенсивність потоку аварійних морських подій, збитки, ймовірність запобігання подіям

та дозволяє визначити цільовий рівень підвищення безпеки судноплавства за мінімальних сумарних витрат.

Розглянуто метод управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання виникнення аварійних морських подій (дуже серйозних або серйозних аварій) і зниження потенційних збитків від них в системі управління без-

пекою судноплавства, в якому, на відміну від відомих, враховуються всі заходи щодо запобігання або зниження несприятливих ризиків виникнення аварійних морських подій з морським або річковим, що дозволяє забезпечити мінімальні витрати на запобігання ризикам виникнення аварійних морських подій і зниження потенційного збитку від них.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аварії та інциденти на морському та річковому транспорті за 2018 рік. Офіційний сайт Укртрансбезпеки / Аналіз аварійності. URL: <http://dsbt.gov.ua/storinka/avariyi-ta-incydynty-na-morskomu-ta-richkovomutransporti-za-2018-rik>.
2. Стан аварійності та безпеки судноплавства на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна за 1 півріччя 2019 року з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/public-information/analiz-4-avariynosti-za-2-kv-2019.docx>.
3. Стан аварійності та безпеки судноплавства на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна за 2019 рік з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/public-information/analiz-avariynostiza-2019.pdf>.
4. Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна за 2020 рік з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/16012021/Zvit_2020.pdf.
5. Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна за перше півріччя 2021 року з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: https://data.gov.ua/dataset/cf069d00-9793-4974-9367-d39796282a59/resource/f9fa8a7c-74eb-4e62-ae62-7bcef5a02e/download/zvit_1pivrich_2021.pdf.
6. Топалов В. П. Риски в судоходстві / В. П. Топалов, В. Г. Торський. — Одеса: Астропринт, 2007. — 368 с.
7. Kristiansen S. Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis / S. Kristiansen. — Elsevier, 2010. — 508 p.
8. Gucma M. Combination of processing methods for various simulation data sets / M. Gucma // TransNav. — 2008. — № 2(1). — P. 11–15.
9. Kobyliński L. Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties / L. Kobyliński // TransNav. — 2009. — № 3(4). — P. 443–448.
10. Yin J. Quantitative Risk Assessment for Maritime Safety Management / PhD thesis. Hong Kong Polytechnic University. — 2011. <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/>
11. Торський В. Г., Топалов В. П. Воспитание «культуры безопасности» курсантов в процессе обучения // Морское обозрение. — 2008. — 1Е4(18). — С. 12-16.
12. Махмурова-Дишлюк О. П. Безпека судноплавства як важлива умова охорони людського життя / Махмурова-Дишлюк О. П. // Юридичний вісник. — 2016. — № 3 (40) — С. 11-16.
13. Кох, Ричардгуен Принцип 80/20 [пер. с англ.] — М., Эксмо, 2012. — 443 с.
14. Ашманов С.А. Линейное программирование — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981 — 340 с.
15. Загородня Ю. В. Мінімізація комерційних витрат морських перевезень шляхом підвищення безпеки мореплавства. Вісник Хмельницького національного університету. 2020. № 4. Том 2. С. 97–100.

Received (Надійшла) 11.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.02.2023

Method of unacceptable risks management for determination of costs for prevention of maritime accidents and reduction of potential losses from them in the system of navigation safety management

Anna Boiko, Viktor Yarmak

Abstract. The article considers the method of unacceptable risks management for determining the costs of preventing the occurrence of maritime accidents (very serious or serious accidents) and reducing the potential damage from them in the navigation safety management system, which takes into account all measures to prevent or reduce the adverse risks of maritime accidents with sea or river, which allows to ensure the minimum costs of preventing the risks of maritime accidents and reducing the potential damage from them. A mathematical model for determining the generalized costs that reduce the adverse risk of a maritime accident has been improved, which considers very serious accidents and serious accidents, the intensity of the flow of maritime accidents, losses, the probability of preventing events and allows to determine the target level of improving the safety of navigation at the minimum total cost. At the same time, a formal representation of the adverse risk of occurrence of maritime accidents was performed, considering not only the factors affecting the safety of navigation, but also the expected average damage. Formal representation of prevention of maritime accidents considering the main factors and implementation of measures to reduce the adverse risks of maritime accidents was performed. The definition of adverse risks of maritime accidents considering their prevention (reduction) is performed.

Keywords: method, risk, maritime accident, maritime and river transport, risk, damage, probability, factor, navigation safety management system.

Д. О. Галінський, Р. В. Куліш

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

МЕТОД МОНІТОРИНГУ СТАНУ СТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИНАМІЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Анотація. Задача маршрутизації безпілотного літального апарату є багатокроковою задачею, що полягає у виборі наступної точки моніторингу серед множини можливих. Оскільки процес прийняття рішень при плануванні маршруту може бути розділений на окремі етапи доцільним є застосування динамічного програмування. В статті розглянуто проблему маршрутизації безпілотного літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів. Принциповою відмінністю розв'язуваної задачі від існуючих методів є припущення про альтернативність управління. Завдання оптимізації вирішується за умови, що всі коефіцієнти функції ризику в правій частині рівняння Белмана залежать від j -го номера обраної альтернативи. Проведений розрахунок польотних ситуацій, що свідчить про необхідність використання спрощеного підходу розрахунку точки польоту, для якого додатково потрібні середні значення ординат ризику.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, маршрутизація, пошук маршруту, моніторинг, стаціонарний об'єкт динамічне програмування, рівняння Белмана.

Вступ

Постановка проблеми. Активний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА), технічних та програмних компонент, широка сфера їх застосування вимагає пошуку нових рішень задач, пов'язаних з їх застосуванням. На теперішній час безпілотні системи є невід'ємною частиною будь-якої сфери людської діяльності: військова справа, пошуково-рятувальні місії, сільське господарство, будівництво та ін. Більшість із завдань, що вирішуються прямо чи опосередковано пов'язані із пошуком/моніторингом рухомих та статичних об'єктів земної поверхні.

В свою чергу, підвищення рівня розвитку сучасних інформаційних технологій, спонукає до пошуку алгоритмів побудови систем підтримки прийняття рішень при управлінні БПЛА, а задача маршрутизації БПЛА для пошуку та моніторингу об'єктів є окремою задачею. Планування моніторингу стаціонарних об'єктів вимагає врахування низки факторів та полягає у виборі точки польоту із множини можливих. Розділення задачі на окремі етапи дозволяє застосувати метод оптимізації за принципом Белмана.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі пошуку маршруту польоту безпілотного літального апарату присвячена велика кількість робіт закордонних та вітчизняних авторів. Серед найбільш відомих потрібно відмітити наступних: Gustavo Avellar, Ryan R. Pitre, X. Rong Li, Q. Zhang, M. Jiang, Д.В. Моїсєєв, Н.В. Аллилуєв у працях яких розглянуті питання побудови оптимального маршруту, опису принципів їх роботи та реалізації.

В роботі [1] запропоновано підхід планування маршруту для спільних місій БПЛА з пошуку та відстеження об'єктів. Для оптимізації маршруту руху БПЛА використано модифікований алгоритм оптимізації рою частинок та цільовою функцією, для визначення траєкторії. Алгоритм опирається на визначення траєкторії, якає найкращою для виявлення

та відстеження цілі враховуючи поточне місце БПЛА.

В робота [2] присвячена маршрутизації БПЛА для мереж бездротових датчиків. Маршрут БПЛА визначається шляхом послідовного коригування розташування кожного БПЛА на основі аналізу стану енергії датчика на основі діаграми Вороного. Для пошуку оптимального рішення запропоновано використання методу визначення початкового маршруту БПЛА з урахуванням енергії датчиків.

В роботі [3] використовуючи динамічне програмування вирішена задача оптимального маршруту двох БПЛА при пошуку рухомої цілі. Запропонований в роботі підхід дозволяє скоординувати управління БПЛА мінімізуючи помилки геолокації.

У роботі [4] представлено розроблене програмне забезпечення METPASS для планування та аналізу траєкторій польоту БПЛА з урахуванням метеорологічних даних. METPASS дозволяє оптимізувати порядок виконання місій БПЛА враховуючи: оптимальну траєкторію розміщення на тривимірній сітці для точок відправлення та прибуття в основі якої покладено застосування підходу динамічного програмування та функції вартості, яка враховує екологічні небезпеки вітру, польоту.

В роботі [5] розроблено метод автоматизованого планування маршрутів БПЛА з урахуванням порядку виявлення стаціонарних об'єктів. Ранжування об'єктів пошуку здійснено за важливістю. В основу зміни маршрутів польоту БПЛА використовується базове поняття теорії симплексів – симпліційний аналіз.

В роботі [6] розроблено метод автоматизованого планування маршрутів пересування безпілотних транспортних засобів заснований на мурашиному алгоритмі. Метод дозволяє за вхідними даними у вигляді мінімальної та максимальної швидкостей руху безпілотного транспорту, координат початку руху, координат точок зупинок, координати кінцевої точки та обмежень у часі одержувати вихідні дані в вигляді послідовного списку відвідування точок, на

який затрачується найменше часу з врахуванням мінімальної та максимальної швидкості безпілотно-го транспортного засобу.

Низка робіт [7, 8, 9, 10] доводить переваги динамічного програмування для вирішення задач оптимізації, зокрема для задач планування.

Метою статті вирішення задачі пошуку маршруту польоту безпілотно-го літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів методом динамічного програмування.

Виклад основного матеріалу

Вирішення задачі маршрутизації безпілотно-го літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів за допомогою динамічного програмування. скільки маршрут БПЛА, що обирається, є результатом багатокрокового вибору чергового пункту, а прийняття рішення на кожному кроці крім поточного штрафу у вигляді втраченого часу ще має наслідки для майбутніх кроків, найбільш ефективним методом оптимізації є динамічне програмування [11]. Враховуючи дискретний характер альтернативних рішень при виборі елементів об'єктів моніторингу, рівняння Белмана у часткових похідних можна записати як:

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \min_j \left\{ f_{0j} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} \dot{x}_j + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \dot{z}_j + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \alpha} \dot{\alpha}_j \right\} =$$

$$= \min_j \left\{ f_{0j} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} \frac{x_j - x}{r_j} V + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \frac{z_j - z}{r_j} V + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \alpha} \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} V \right\} = \quad (1)$$

$$= F_j \{x, z, \alpha\},$$

де \mathcal{E} - функція Белмана, F_j - функція поточного ризику з урахуванням наслідків у майбутньому, j - номер пункту, що вибирається в поточний момент часу, r_j - відстань між БПЛА і j -м об'єктом, V - швидкість БПЛА, x_j, z_j - координати у об'єкта, x, z - координати БПЛА, α - курсовий кут БПЛА. Наприклад, це може бути або пункт попереду у напрямку польоту ($j = 1$), ззаду ($j = 2$), зліва ($j = 3$) або праворуч ($j = 4$), як наведено на рис. 1.

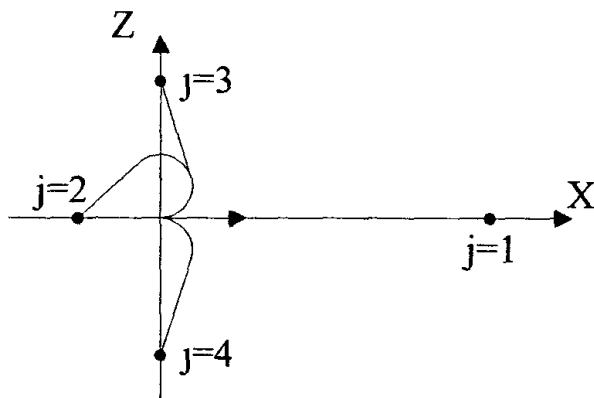


Рис. 1. Розташування пунктів в околиці БПЛА, що мають приблизно однакову довжину шляху, що в районі досяжності

Принциповою відмінністю розв'язуваної задачі від прийнятого в існуючих методах припущення про безперервність управління є те, що управління є альтернативним (зокрема, відповідно до рис. 1, $j = 1, 2, 3, 4$).

Тому для наближеного управління скористаємося підходом [12], заснованому на обчисленні функції мінімального ризику F_j для різних альтернатив у ситуаціях, близьких до меж перемикання при відхиленнях «ліворуч і праворуч» від робочої точки, в якій не можна віддати перевагу жодній альтернативі. Відповідно до цього методу, обчислення цих функцій ризику, званих ординатами ризику C_i здійснюється спочатку шляхом подання функції Белмана статичним рядом

$$\varepsilon(\bar{x}_n, \tau) = \alpha(\tau) + \sum_{l=1}^n \beta_l(\tau) x_l +$$

$$+ \sum_{l=1}^n \gamma_l(\tau) \frac{x_l^2}{2} + \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{k=l+1}^n \psi_{lk}(\tau) x_l x_k, \quad (2)$$

де $\varepsilon(\bar{x}_n, \tau)$ - функція - Белмана, $\alpha(\tau), \beta_l(\tau), \gamma_l, \psi_{lk}$ - коефіцієнти полінома, x_j - j -й елемент вектора координат x_n .

Незалежно від значень вихідних даних розв'язуваної задачі, функції ризику $F_j(\bar{x}_n, \tau)$ видаються поліномами того самого порядку, що і функція Белмана $\varepsilon(\bar{x}_n, \tau)$, а ординати ризику:

$$c_i^- = \min_j \{F_j(\bar{x}_p - \Delta x_i)\};$$

$$c_i^+ = \min_j \{F_j(\bar{x}_p + \Delta x_i)\};$$

$$c_{ii}^{++} = \min_j \{F_j(\bar{x}_p + \Delta x_i + \Delta x_i)\}.$$

і коефіцієнти $\beta_l, \gamma_l, \psi_{lk}$ обчислюються в припущенні очевидної переваги однієї альтернативи перед іншими в окремих точках простору стану, наприклад, у середині інтервалу x_{pl} , а також на лівій та правій межах інтервалу можливих значень змінних x_l .

На відміну від випадку відкритої області управління $u(\tau)$ завдання оптимізації вирішується за умови, що всі коефіцієнти функції ризику в правій частині рівняння Белмана залежать від j -го номера обраної альтернативи, а мінімізація функціонала здійснюється апроксимацією множини функцій ризику F_j , що перетинаються, одним статичним поліномом. Для чого використовується метод робочої точки. Це дозволяє записати систему диференціальних рівнянь щодо шуканих коефіцієнтів апроксимації $\alpha(\tau), \beta_l(\tau), \gamma_l(\tau), \psi_{lk}(\tau)$, визначити значення цих коефіцієнтів, що встановилося, при асимптотичній поведінці оптимальної системи і довести рішення задачі до кінця, якщо прирівняти ординати ризику один одному.

$$C_0 = c_i^+ = c_i^- = c_{ik}^\pm. \quad (3)$$

Обчислення ординат мінімального ризику у різних польотних ситуаціях. Попередні дослідження показали, що стосовно даної задачі подання функції Белмана є у квадратичній формі недостат-

ньо, щоб отримати адекватний опис. Тому була взята наступна апроксимація:

$$\varepsilon = \alpha + \beta_1 x + 0,5\gamma_1 x^2 + \beta_2 z + 0,5\gamma_2 z^2 + \beta_3 \alpha + 0,5\gamma_3 \alpha^2 + \psi_{12} xz + \psi_{13} x\alpha + \psi_{23} z\alpha + \lambda xz\alpha, \quad (4)$$

де $\beta_l, \gamma_l, \psi_{lk}, \lambda$ – коефіцієнти, а останній доданок $\lambda xz\alpha$ містить добуток трьох змінних. Отримавши значення $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}$ виразу 4 і підставивши в до виразу 2, отримаємо у вигляді формулу для обчислення функції ризику $F_j(x, z, \alpha)$:

$$F_j = \frac{r_j}{V\Delta t} + (\beta_1 + \gamma_1 x + \psi_{12} z + \psi_{13} \alpha + \lambda z\alpha) \frac{x_j - x}{r_j} V + (\beta_2 + \gamma_2 z + \psi_{12} x + \psi_{23} z + \lambda x\alpha) \frac{z_j - z}{r_j} + (\beta_3 + \gamma_3 \alpha + \psi_{13} x + \psi_{23} z + \lambda xz) \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} = (5)$$

$$= \frac{r_j}{V\Delta t} + (\beta_1 + \gamma_1 x + \psi_{12} z + \psi_{13} \alpha + \lambda z\alpha) \frac{\Delta x_j}{r_j} V + (\beta_2 + \gamma_2 z + \psi_{12} x + \psi_{23} z + \lambda x\alpha) \frac{\Delta z_j}{r_j} V + (\beta_3 + \gamma_3 \alpha + \psi_{13} x + \psi_{23} z + \lambda xz) \frac{\Delta \alpha_j}{r_j} V,$$

де $\Delta x_j = x_j - x, \Delta z_j = z_j - z, \Delta \alpha_j = \alpha_j - \alpha$ – збільшення координат векторapotочний стан динамічної системи.

Тепер можна приступити до обчислення ординат ризику, поставивши в якості робочої точки положення БПЛА, представлене на рис. 1, коли відстань до пунктів 1,2,3,4 обрано таким чином, що вони приблизно однакові, і не можна віддати перевагу жодній з альтернатив.

При даних припущеннях координати робочої точки дорівнюють $x = x_0; z = z_0; \alpha = 0$, авідстань r_j між БПЛА та пунктами були взяті кратними мінімальному радіусу R , дорівнює: $r_1 = 8R, r_2 = R, r_3 = r_4 = 3R$. Це дозволяє обчислити першу ординату C_0 як середнє значення з 4 функцій ризику, що виникають при перельоті БПЛА у різних напрямках.

$$C_0 = 0,2\beta_l + 0,2x_0\gamma_l + 0,2z_0\psi_{l2} + \frac{5,8R}{V^2\Delta t}. \quad (6)$$

Тепер розглянемо польотні ситуації за відхилень від робочої точки. При $x = x_0 + \Delta x_1 = x_0 + R$ мінімальний штраф буде при польоті ЛА пункт 1, а за $x = x_0 + \Delta x_2 = x_0 - 9R$ краще летіти в пункт 2, тому

$$c_1^+ = \min_j F_j \left(\begin{matrix} x = x_0 + R \\ z = z_0 \\ \alpha = 0 \end{matrix} \right) = (x_0 + R)\gamma_1 + z_0\psi_{12} + \frac{7R}{V^2\Delta t};$$

$$c_1^- = \min_j F_j \left(\begin{matrix} x = x_0 + 9R \\ z = z_0 \\ \alpha = 0 \end{matrix} \right) = \beta_1 + (x_0 - 9R)\gamma_1 + z_0\psi_{12} + \frac{8R}{V^2\Delta t}. \quad (7)$$

Різні за модулем відхилення Δx_1 і Δx_2 були взяті для того, щоб напрямком польоту ЛА було однаково - вперед. Ілюстрація польотних ситуацій представлена на рис. 2, 3.

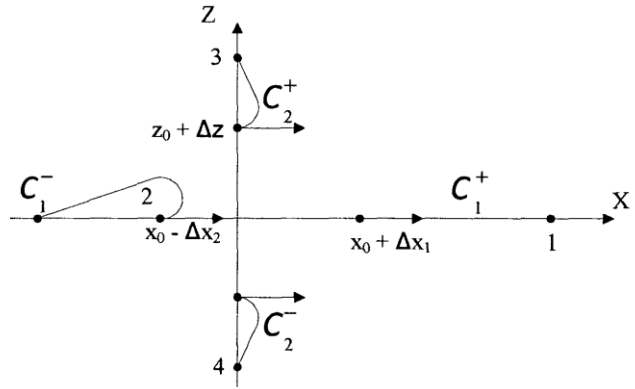


Рис. 2. Ілюстрація польотних ситуацій при почергових відхиленнях щодо та z від робочої точки

Розглянемо відхилення Δz по другій координаті z. При $z = z_0 + \Delta z$ мінімальний шлях БПЛА буде при польоті до пункту 3, а при $z = z_0 - \Delta z$ – при польоті до пункту 4.

Тому при $\Delta z = R$ отримаємо:

$$c_2^+ = \min_j F_j \left(\begin{matrix} x = x_0 \\ z = z_0 + R \\ \alpha = 0 \end{matrix} \right) = 0,8x_0\psi_{12} + 0,8\beta_2 + 0,8(z_0 + R)\gamma_2 + \frac{0,55}{R}\beta_3 + \frac{0,55x_0}{R}\psi_{13} + \frac{0,55(z_0 + R)}{R}\psi_{23} + \frac{0,55x_0(z_0 + R)}{R}\lambda + \frac{3,7R}{V^2\Delta t};$$

$$c_2^- = \min_j F_j \left(\begin{matrix} x = x_0 \\ z = z_0 - R \\ \alpha = 0 \end{matrix} \right) = -0,8x_0\psi_{12} - 0,8\beta_2 - 0,8(z_0 - R)\gamma_2 - \frac{0,55}{R}\beta_3 - \frac{0,55x_0}{R}\psi_{13} - \frac{0,55(z_0 - R)}{R}\psi_{23} - \frac{0,55x_0(z_0 - R)}{R}\lambda + \frac{3,7R}{V^2\Delta t}. \quad (8)$$

Ілюстрація для оцінок ординат c_2^+ та c_2^- також представлена на рис. 2. Далі, задавшись відхиленнями α , при $\Delta \alpha = \pm \pi/2$ отримаємо очевидний вибір альтернатив польоту, як показано на рис. 3, при досягненні пунктів 3 та 4.

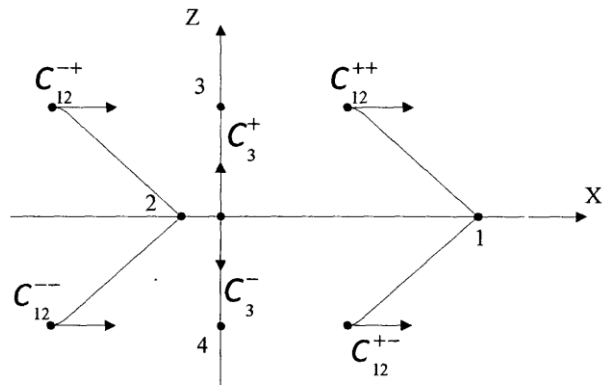


Рис. 3. Ілюстрація польотних ситуацій при відхиленні α і попаданні в пункти 3 та 4 і попарних відхиленнях по x та z при попаданні в пункти 1 та 2

При $\Delta\alpha = \pi/2$ потрібно летіти в пункт 3, при $\Delta\alpha = -\pi/2$ в пункт 4, і це забезпечить мінімальний час польоту.

Тому ординати c_3^+ та c_3^- рівні:

$$c_3^+ = x_0\psi_{12} + \beta_2 + z_0\gamma_2 + \frac{\pi}{2}(\psi_{23} + x_0\lambda) + \frac{4R}{V^2\Delta t};$$

$$c_3^- = -\left[x_0\psi_{12} + \beta_2 + z_0\gamma_2 + \frac{\pi}{2}(\psi_{23} + x_0\lambda)\right] + \frac{4R}{V^2\Delta t}.$$

Тепер потрібно попарними відхиленнями координат системи і, як показано на рис. 2 та 4 число польотних ситуацій збільшується вдвічі. Так при відхиленнях по x і z виникають 4 ситуації, для яких очевидна перевага перельоту в пункт 1 при $x = x_0 + \Delta x_1$ і в пункт 2 при $x = x_0 + \Delta x_2$.

Зокрема, за $x = x_0 + R$; $z = z_0 + 3R$ отримаємо:

$$c_{12}^{++} = 0,97\beta_1 - 0,14\beta - \frac{0,02}{R}\beta_3 + 0,97 \times$$

$$\times (x_0 + R)\gamma_1 - 0,14(z_0 + R) + 0,97z_0\psi_{12} -$$

$$- \frac{0,02}{R}(x_0 + R)\psi_{13} - \frac{0,02}{R}(z_0 + R)\psi_{23} -$$

$$- 0,02(x_0 + R)\lambda + \frac{7,2R}{V^2\Delta t}. \quad (9)$$

Аналогічним чином можна надійти в оцінці ординат мінімального ризику C_{13} під час розгляду 4 ситуацій, показаних на рис. 4.

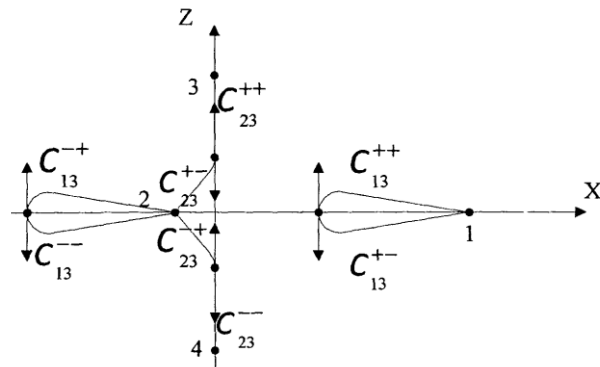


Рис. 4. Ілюстрація польотних ситуацій при попарних відхиленнях α і x і відповідно $-\alpha$ і z

У цих випадках краще летіти до пункту 2, якщо $x = x_0 - \Delta x_2$ і до пункту 1, якщо $x = x_0 + \Delta x_1$. Тому отримуємо, зокрема, при $x = x_0 + R$, $\Delta\alpha = \pi/2$ оцінку c_{13}^{++} мінімального ризику у вигляді:

$$c_{13}^{++} = 0,87\beta_1 - \frac{0,225}{R}\beta_3 + 0,87(x_0 + R)\gamma_1 -$$

$$- \frac{0,35}{R}\gamma_3 + 0,87z_0\psi_{12} - \left(1,145 + 0,225\frac{x_0}{R}\right)\psi_{13} -$$

$$- 0,225\frac{z_0}{R}\psi_{23} + \left(1,145 + 0,225\frac{x_0}{R}\right)z_0\lambda + \frac{8R}{V^2\Delta t}.$$

При попарних відхиленнях α і z також виникають 4 ситуації, ілюстровані на рис 5, причому:

в пункт 2 краще летіти при $z = z_0 + R$, $\Delta\alpha = -\pi/2$ і $z = z_0 + R$, $\Delta\alpha = \pi/2$,

в пункт 3 – при $z = z_0 + R$, $\Delta\alpha = \pi/2$,

в пункт 4 – при $z = z_0 - R$, $\Delta\alpha = -\pi/2$.

Тому ординати ризику C_{23} рівні:

$$c_{23}^{++} = \beta_2 + (R + z_0)\gamma_2 +$$

$$+ x_0\psi_{12} + \frac{\pi}{2}\psi_{23} + \frac{x_0\pi}{R}\lambda + \frac{3R}{V^2\Delta t};$$

$$c_{23}^{--} = -\beta_2 + (R - z_0)\gamma_2 - x_0\psi_{12} +$$

$$+ \frac{\pi}{2}\psi_{23} + \frac{x_0\pi}{R}\lambda + \frac{3R}{V^2\Delta t};$$

$$c_{23}^{\pm} = -\frac{2}{\pi}\beta_1 - \frac{2}{\pi}\beta_2 - \frac{1}{R}\beta_3 - \frac{2x_0}{\pi}\gamma_1 -$$

$$- \frac{2}{\pi}(z_0 + R)\gamma_2 + \frac{\pi}{2R}\gamma_3 - \frac{2}{\pi}\psi_{12} \times$$

$$\times (z_0 + x_0 + R) + \left(1 - \frac{x_0}{R}\right)\psi_{13} - \frac{z_0}{R}\psi_{23} +$$

$$+ \left(z_0 + R - \frac{x_0z_0}{R}\right)\lambda + \frac{\pi}{2}\frac{R}{V^2\Delta t};$$

$$c_{23}^{\mp} = -\frac{2}{\pi}\beta_1 + \frac{2}{\pi}\beta_2 - \frac{1}{R}\beta_3 - \frac{2x_0}{\pi}\gamma_1 + (z_0 - R) \times$$

$$\times \frac{2}{\pi}\gamma_2 + \frac{\pi}{2R}\gamma_3 - \frac{2}{\pi}(z_0 - x_0 - R)\psi_{12} - \left(1 - \frac{x_0}{R}\right) \times$$

$$\times \psi_{13} + \frac{z_0}{R}\psi_{23} - \left(z_0 + R - \frac{x_0z_0}{R}\right)\lambda + \frac{\pi}{2}\frac{R}{V^2\Delta t}.$$

Залишилося розглянути останній випадок одночасно трьох можливих відхилень $\Delta x, \Delta z, \Delta\alpha$, яким відповідає 8 можливих комбінацій, показаних на рис. 5.

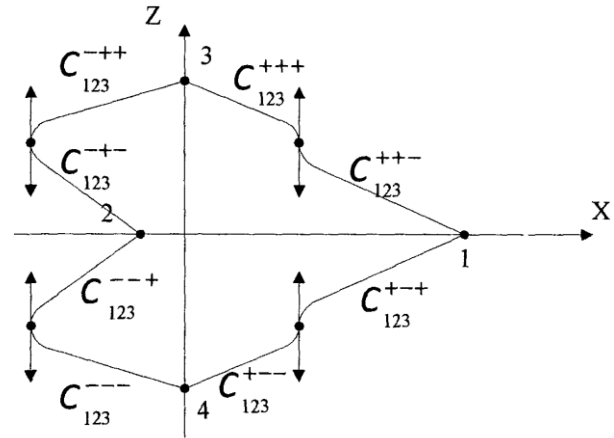


Рис. 5. Ілюстрація 8 польотних ситуацій при одночасному відхиленні по x, z та α від робочої точки

Зокрема, при

$$x = x_0 + R; z = z_0 + R; \Delta\alpha = \pi/2$$

потрібно летіти в пункт 3, і відповідно ордината ризику c_{123}^{+++} дорівнює:

$$c_{123}^{+++} = -0,44\beta_1 + 0,88\beta_2 + \frac{0,22}{R}\beta_3 -$$

$$- 0,44(x_0 + R)\gamma_1 + 0,88(x_0 + R)\gamma_2 + \frac{0,34}{R}\gamma -$$

$$- (0,44z_0 + 0,88x_0 + 0,44R)\psi_{12} +$$

$$+ \left(\frac{0,22x_0}{R} - 0,46\right)\psi_{13} + \left(\frac{0,22z_0}{R} - 1,6\right)\psi_{23} +$$

$$+ \left(\frac{0,22x_0z_0}{R} - 0,5z_0 + 1,6x + 0,93R\right)\lambda + \frac{2,3R}{V^2\Delta t}. \quad (11)$$

Таким чином, якщо проаналізувати всі розглянуті вище польотні ситуації, то можна побачити, що всього виходить 27 різних ординат, а прирівнювання їх один одному для оцінки 10 шуканих коефіцієнтів $\beta_1, \gamma_1, \psi_{1k}, \lambda$ функції Белмана представляє важко осяжне число систем рівнянь, дорівнює кількості поєднань C_{27}^{10} .

Тому був використаний спрощений підхід, для якого додатково потрібні так звані «середні» ординати ризику C_{13} і C_{23} обчислені за формулами:

$$\begin{aligned} C_{13} &\approx 0,25(c_{13}^{++} + c_{13}^{\pm} + c_{13}^{\bar{+}} + c_{13}^{\bar{-}}); \\ C_{23} &\approx 0,25(c_{23}^{++} + c_{23}^{\pm} + c_{23}^{\bar{+}} + c_{23}^{\bar{-}}). \end{aligned} \quad (12)$$

Отже, спрощений підхід дозволяє визначити середні значення ординат ризику необхідні для розрахунку польотних ситуацій.

Висновки

Задача побудови маршруту БПЛА є багатокроковою та потребує від оператора вибору наступної

точки польоту зважаючи на польотну ситуацію. Для вирішення задачі оптимізації введена система штрафів - прийняття рішення на кожному кроці, крім поточного, накладається штраф у вигляді втраченого часу, що має наслідки для майбутніх кроків, а отже справедливим є припущення, що управління БПЛА є альтернативним.

В статті вирішена задача планування маршруту польоту БПЛА із застосуванням динамічного програмування за принципом Белмана. Завдання оптимізації вирішується за умови, що всі коефіцієнти функції ризику в правій частині рівняння Белмана залежать від j -го номера обраної альтернативи.

Проведений розрахунок польотних ситуацій, що свідчить про необхідність використання спрощеного підходу розрахунку точки польоту, для якого додатково потрібні середні значення ординат ризику.

Отже, часткова задача маршрутизації безпілотного літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів є вирішеною.

Список літератури

1. UAV route planning for joint search and track missions—An information-value approach / Ryan R., Rong Li, R. Delbalzo // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.—2012.—№48.— С. 2551-2565.
2. Energy-efficient UAV routing for wireless sensor networks / B.Jaeuk, S. Ik Han, Y. Han // IEEE Transactions on Vehicular Technology.— 2019.—Vol.69, No2.— p.1741-1750.
3. Optimal UAV coordination for target tracking using dynamic programming / Quintero S. A., Papi F., Klein D. J., Chisci L., Hespanha J. P. // IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2010, December. — pp. 4541-4546.
4. Meteorological path planning using dynamic programming for a solar-powered UAV / Wirth L., Oettershagen P., Ambühl J., Siegwart R. // 2015 IEEE aerospace conference, 2015, March, 2015— P. 1-11.
5. Метод автоматизованного планування маршрута безпілотного летального апарату с учетом выявления стационарных объектов / Бережний А.О., Крижанівський І.М., Барабаш О.В.// Телекомунікаційні та інформаційні технології.—2019.—№4.—С. 90-98.
6. Метод використання мурашиного алгоритму для автоматизованого планування маршрутів пересування безпілотних транспортних засобів /Мельник А.В. // The 10th International scientific and practical conference :Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions, November 29-December 2022.—Bilbao, Spain, 2022.— 606 p.
7. О решении задачи оптимизации методом динамического программирования /Абляимов О.С. // Universum: технические науки.—2020.—№9-1.—78 С.
8. Элементы динамического программирования в экстремальных задачах маршрутизации / Ченцов А.А., Ченцов П.А. // Проблемы управления.— 2013.—№5.—С.12-21.
9. Dynamic routing-and-inventory problems: a review / B. Flavio // Transportation Research Part A: Policy and Practice.— 1998.—P. 585-598
10. Dynamic routing of bandwidth guaranteed tunnels with restoration / K. Murali, T. V. Lakshman. // Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2000.— Vol. 2.— P.902-911.
11. Applied dynamic programming / Bellman Richard E., Stuart E. Dreyfus //Princeton university press, 2015.—Vol. 2050.
12. Dynamic programming and minimum risk paths / Serafini, P.// European Journal of Operational Research, 2006.— №175(1).— P.224-237.

Received (Надійшла) 17.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.03.2023

Method of monitoring the condition of stationary elements of critical infrastructure objects by uavs using dynamic programming

D. Galinskiy, R. Kulish

Abstract. The task of routing an unmanned aerial vehicle is a multi-step task consisting in choosing the next monitoring point among many possible ones. Since the decision-making process in route planning can be divided into separate stages, it is advisable to use dynamic programming. The article considers the problem of routing an unmanned aerial vehicle for monitoring stationary objects. The fundamental difference between the problem being solved and the existing methods is the assumption of alternative control. The optimization task is solved under the condition that all coefficients of the risk function on the right side of the Belman equation depend on the j -ro number of the chosen alternative. Flight situations have been calculated, which indicates the need to use a simplified approach for calculating the flight point, which additionally requires average values of risk ordinates.

Keywords: unmanned aerial vehicle, routing, route search, monitoring, stationary object, dynamic programming, Belman equation.

М. А. Денисенко, Д. Г. Караман, А. О. Зуєв, М. В. Гунбін

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

РЕГУЛЮВАННЯ КРЕНУ БПЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГНОЗУЮЧОЇ МОДЕЛІ

Анотація. В статті розглянуто процес регулювання крена БПЛА з фіксованим крилом з застосуванням прогнозуючої моделі. **Метою** статті є аналіз та оптимізація процесу регулювання крена за допомогою системи автоматичного керування. Проведено аналіз існуючих технічних рішень та математичних моделей, які описують поведінку літального апарату в повітрі. Наведено алгоритм функціонування Model Predictive Control (MPC)-методу, який лежить в основі схеми керування динамічними об'єктами. Було обрано систему динаміки для БПЛА з фіксованим крилом, яка дозволяє якісно підтримувати кут крену близько до нуля градусів. Розглянуто вирішення завдань оптимізації із застосуванням прогнозуючої моделі. За **результатами** дослідження отримано характеристику перехідних процесів для системи регулювання третього порядку.

Ключові слова: БПЛА, літак, кут крену, система автоматичного керування, MPC-метод, прогнозуюча модель, передатна функція, оптимізація.

Вступ

Системи автоматичного керування дають можливість підтримувати необхідні режими роботи різних технічних об'єктів безпосередньо без участі людини. Зокрема, такі системи дозволяють реалізувати програмне керування БПЛА з фіксованим крилом на різних етапах польоту [1], що значно спрощує та робить більш ефективним використання авіаційної техніки, зокрема БПЛА, навіть при вирішуванні складних задач пілотування.

Система автоматичного керування дозволяє використовувати невелику кількість датчиків інформації про стан польоту яку можна отримати від зовнішніх систем. Обчислювальне ядро таких систем забезпечує достатню надійність та стабільність за рахунок багатократного резервування та охоплення системою вбудованого контролю.

В зв'язку з розвитком складності завдань та напрямів застосування БПЛА, також зростає складність алгоритмів керування та продовжується процес автоматизації окремих етапів польоту. Точна модель БПЛА з фіксованим крилом, яка описує його поведінку в повітрі являє собою систему нелінійних диференціальних рівнянь зі змінними параметрами, методика знаходження рішень яких детально викладена у [2], але її недоліком є значна математична складність, що ускладнює її використання в малорозмірних БПЛА з бортовими комп'ютерами невеликої обчислювальної потужності. В статті буде розглянута більш практична модель керування.

Огляд існуючих технічних рішень

Одними з перших регуляторів що застосовувались для керування процесом польоту літаків були ПІ- та ПІД-контролери. Вони довели свою ефективність в управлінні різноманітними процесами. Використання таких контролерів не вимагає знання точної моделі процесу, тому вони ефективні в управлінні промисловими процесами, математичні моделі яких досить складні. ПІ- та ПІД-контролери будуються на основі класичної теорії управління та прості для розуміння, тому встановлення зв'язків між параметрами

управління діями системи можуть здійснюватися інженерами-практиками та безпосередньо операторами. Крім того, за останні десятиліття розроблено кілька методів налаштування ПІ- та ПІД-контролерів. Наприклад, Зіглер і Нікольс запропонували метод налаштування, заснований на даних про реакцію на одиничний ступінчастий вплив. Цей метод широко використовувався протягом багатьох років і виявився досить ефективним на практиці. На його основі Такахаші запропонував метод налаштування для ПІ- та ПІД-контролерів з дискретним часом. Більш сучасний спосіб автоматичного налаштування ПІ- та ПІД-контролерів був запропонований Нішикавою у роботі [3]. Він вимагає подачі вхідного випробувального сигналу для оцінки параметрів процесу керування. Оптимальні значення ПІ- та ПІД-параметрів досягаються шляхом мінімізації зваженого інтеграла квадратичної помилки. Однак, поряд з вищезазначеними перевагами, ПІ- та ПІД-контролери мають і ряд недоліків. Так, якщо робоча точка процесу змінюється, параметри контролера потрібно перенастроювати вручну, щоб отримати нове оптимальне налаштування, яке має виконуватися достатньо досвідченим оператором. Для систем із взаємодіючими контурами ця процедура може бути складною та займати багато часу.

Одним із сучасних підходів до аналізу та синтезу систем керування, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія керування динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC). Цей метод почав розвиватися ще на початку 60-х років ХХ сторіччя, для керування процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких застосування традиційних методів синтезу було вкрай утруднене у зв'язку з винятковою складністю математичних моделей що застосовуються. Ідея оптимізації прогнозованого програмного руху, що є основою MPC-методів, виникла в рамках двох незалежних, однак близьких по суті підходів. Перший з них, що називається Dynamics Matrix Control (DMC), розвивався зусиллями фахівців компанії Shell Oil, а другим – Model Algorithmic Control (MAC) – був розроблений французькими інженерами хімічної промис-

ловості. На основі останнього підходу також вперше було створено комерційний пакет програм IDCOM (Identification and Command), який певною мірою послужив прообразом сучасної програмної підтримки методів керування з прогнозом.

В наш час MPC-метод перебуває у стадії інтенсивного розвитку, про що свідчить велика кількість опублікованих за останні роки наукових праць, присвячених даній проблематиці, зокрема в [4] детально описується алгоритм побудови таких моделей, але не наведена реалізація метода саме на конкретних прикладах, в тому числі в системах керування. У роботі [5] побудована модель керування з прогнозуванням, показана можливість стабільної роботи об'єкта за таким типом керування, але вона потребує багато кроків для оптимізації процесу, що утруднює її практичне застосування для керування польотом БПЛА. Сфера практичного застосування метода також суттєво розширилася та охоплює технологічні процеси в хімічній [6] та будівельній індустрії, легкій та харчовій промисловості [7], в аерокосмічних дослідженнях, у сучасних системах енергетики тощо. Розвиток ідей керування з прогнозуванням відбувається у напрямі використання нелінійних моделей, забезпечення стійкості за Ляпуновим для контрольованих рухів, надання робастних властивостей замкнутій системі управління, застосування сучасних оптимізаційних методів у реальному масштабі часу.

Метою статті є оптимізація процесу керування креном БПЛА з фіксованим крилом з використанням прогнозуючих моделей. При цьому розглянуто вирішення цього завдання з урахуванням вибору різних критеріїв оптимальності та можливостей їхньої технічної реалізації.

Результати досліджень

Основною перевагою MPC-методу, що визначає його успішне використання у практиці побудови та

експлуатації систем керування, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє керувати багатовимірними та багатозв'язаними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійності, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі та керовані змінні, враховувати невизначеність у завданні об'єктів та обурень що виникають в процесі керування. Крім того, можливе врахування як транспортного запізнення так і змін критеріїв якості під час процесу, а також відмов датчиків інформаційно-керуючої системи. Алгоритм функціонування MPC-методу, який лежить в основі схеми керування динамічними об'єктами полягає в наступному:

1. Розглядається деяка (достатньо проста) математична модель об'єкта, початковими умовами для якої є його (об'єкту) поточний стан. При заданому програмному управлінні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на певному кінцевому відрізку часу - горизонті прогнозування.

2. Виконується оптимізація програмного керування, метою якого є наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних сигналів на горизонті прогнозування.

3. Здійснюється оптимізація з урахуванням всього комплексу обмежень, накладених на управляючі та регульовані змінні.

4. На кроці обчислень, який становить фіксовану малу частину горизонту прогнозування, реалізується знайдене оптимальне керування та здійснюється вимірювання (або відновлення за вимірними змінними) фактичного стану об'єкта на кінець кроку.

5. Горизонт прогнозування зсувається на крок уперед і повторюються пункти 1-3.

Схема керування за цим методом з урахуванням прогнозування наведена на рис. 1.

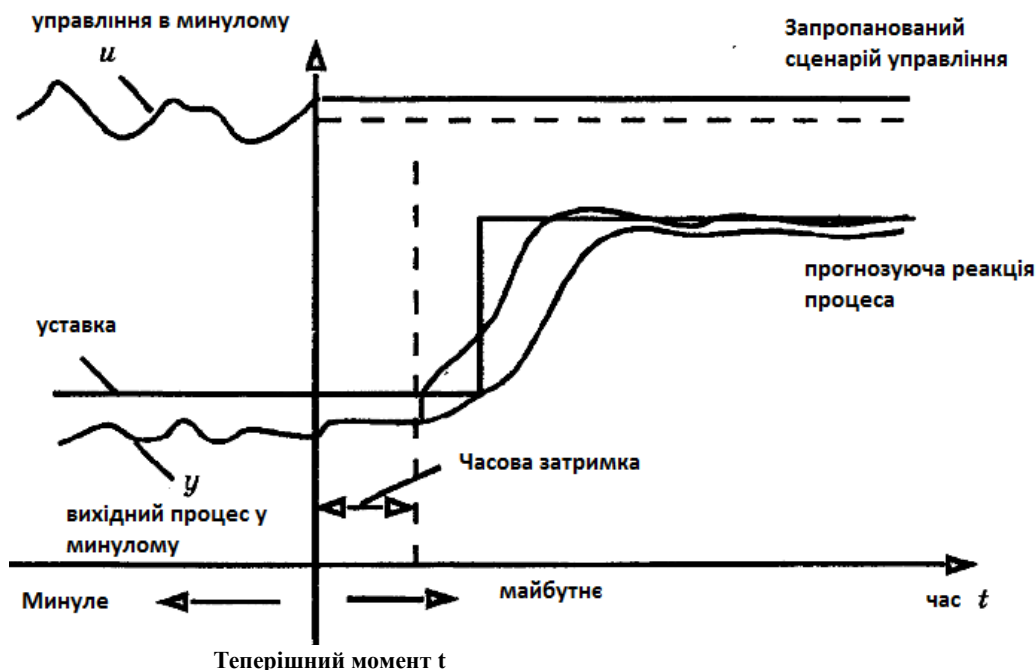


Рис. 1. Схема керування на основі прогнозування

Для розглядання динамічних процесів управління БПЛА з фіксованим крилом, необхідно побудувати математичну модель об'єкта керування. Вона повинна коректно відображати основні властивості реального об'єкта та бути достатньо простою для досліджень. На відміну від математичної моделі керування, яка наведена у [8], в цьому випадку передатна функція не матиме однакових нулів та полюсів, що значно полегшує задачу регулювання.

У багатьох випадках такі спрощення у математичній моделі можуть ефективно використовуватися при аналізі та синтезі як окремих контурів управління, так і системи в цілому.

АЧХ має бути обрана таким чином, щоб при частоті що прагне до 0, амплітуда прагнула до нескінченності, а при великих частотах амплітуда прагнула до 0.

Графік необхідної АЧХ наведено на рис. 2.

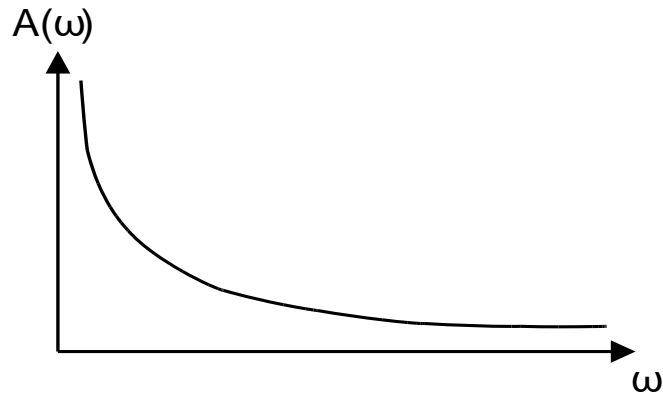


Рис. 2. Графік необхідної амплітудно-частотної характеристики

Система керування положенням БПЛА з фіксованим крилом у повітрі є замкненою і такою що складається з підсилювача, приводу елерона та передатної функції динаміки. Але на відміну від системи що запропонована у [9] доцільно збільшити коефіцієнти аперіодичних ланок, наприклад, до 10 та 11 відповідно, для того щоб досягнути потрібної характеристики наведеної вище. В якості зворотного зв'язку обрано одиничний негативний зв'язок $K_c = 1$.

Розглянемо модель динаміки БПЛА з фіксованим крилом у вигляді передатної функції, яка зв'яже відхилення елеронів і кут крену БПЛА з фіксованим крилом. Структурна схема такої моделі наведена на рис. 3.

Згідно з наведеним методом МРС отримана точна передавальна функція:

$$K(p) = \frac{110}{p(p+1)(p+10)}. \quad (1)$$

Тоді амплітудно-частотна характеристика буде мати такий вигляд:

$$A(\omega) = \left| \frac{110}{j\omega(j\omega+1)(j\omega+10)} \right| = \frac{110}{\omega\sqrt{1+\omega^2}\sqrt{100+\omega^2}}. \quad (2)$$

Процес регулювання складається з підтримки кута крену, таким щоб він був близький до нуля за будь-яких непередбачених зовнішніх обурень. Це регулювання на практиці відбувається за допомогою зміни коефіцієнтів підсилювача та гіроскопу.

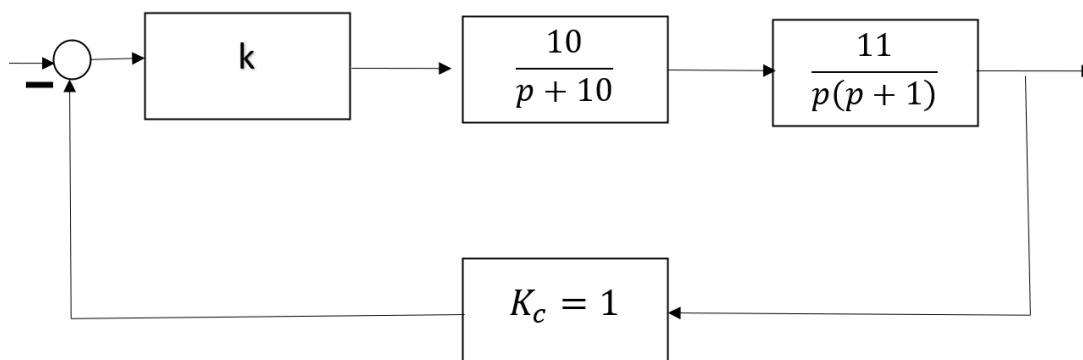


Рис. 3. Структурна схема керування БПЛА з фіксованим крилом

В якості горизонту прогнозування було взято порівняно невеликий інтервал часу [0,40] с, та проведено моделювання процесу регулювання в системі Simulink. На основі розробленої математичної моделі із застосуванням зазначеного метода керування отримано перехідний процес, графік якого наведено на рис. 4.

Отримана характеристика перехідного процесу має відносно низький коефіцієнт перерегулювання (не більше за 15%) та в цілому має вигляд загасаючого процесу, що підтверджує коректність обраної математичної моделі, та можливість її практичного застосування для керування БПЛА за креном.

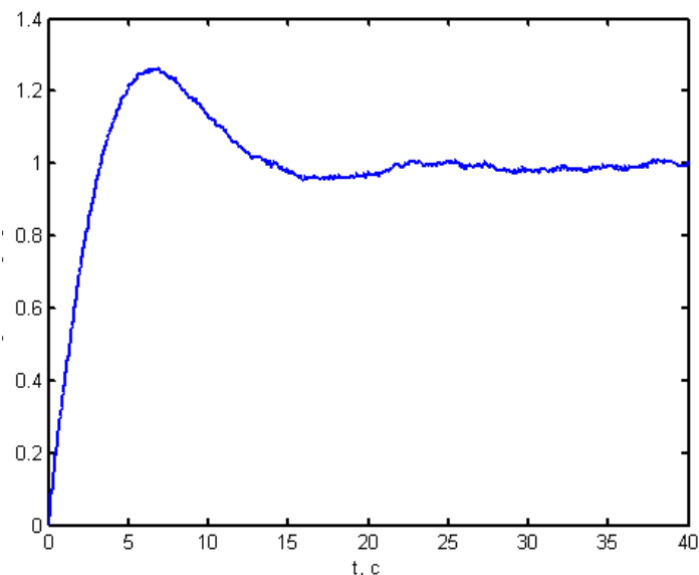


Рис. 4. Графік перехідного процесу

Висновки

1. Проведений аналіз оптимізації процесу регулювання доводить що метод керування за допомогою прогнозуючих моделей (Model Predictive Control, MPC), найбільш повно, порівняно з ПІ- та ПІД-управлінням, зв'язує відхилення елеронів та крен без-

пілотного літального апарату з фіксованим крилом, що дозволяє оптимізувати процес керування в режимі реального часу.

2. Отримані залежності амплітудно-частотної характеристики та перехідних процесів регулювання, як системи третього порядку, доводять ефективність застосування цього методу на практиці.

Список літератури

1. Mani Geetha. Performance Evaluation of Multivariable Optimal and Predictive Controllers on an Aircraft Roll Control System/ Journal of Electrical Engineering, Vol.14. - 2014, p.113-120. ISSN: 1582-4594
2. Maochang Qin, Guihong Fan An effective method for finding special solutions of nonlinear differential equations with variable coefficients// Physics Letters A. – 2008, 372(18):3240-3242 DOI:10.1016/j.physleta.2008.01.058
3. Nishikawa, Y. N Sanomiya, T. Ohta, and H. Tanaka, «A method for auto-tuning of PID control parameters», Automatica, Vol. 20, pp. 321-332, 1984.
4. Bemporad A., Borrelli F., Morari M. Model predictive control based on linear programming – The explicit solution // IEEE transactions on automatic control. 2002. Vol. 47. No 12. P. 1974–1985.
5. Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Scaekaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality // Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 789-814.
6. Diez E., Meyer K., Buck A., Tsotsas E., Heinrich S. Influence of process conditions on the product properties in a continuous fluidized bed spray granulation process // Chemical engineering research and design. – 2018. – Vol. 139. – P. 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.032>
7. Gao X., Wang J., Wang S., Li Z. Modeling of drying kinetics of green peas by reaction engineering approach / X. Gao [et al.] // Drying Technology. – 2016. – Vol. 34, No 4. – P. 437-442. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1060491>
8. Anatoly Garon, Mykola Denysenko, Andrey Zuev, Natalia Yevsina // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 3 (69). – С. 18-21. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.018>
9. Alexandra Gomes, Afzal Suleman Enhancement of Aircraft Roll Maneuvers Using the Spectral Level Optimization Method MDO Methodologies: Aircraft Design Published Online: 2012. <https://doi.org/10.2514/6.2004-4608>

Received (Надійшла) 25.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.02.2023

UAV roll adjustment using a predictive model

Mykola Denysenko, Dmytro Karaman, Andrey Zuev, Mykhailo Gunbin

Abstract. The process of roll control for a Fixed-Wing UAV using a predictive model is considered. The **purpose** of the article is the analysis and optimization of the aircraft roll control process using an automatic control system. An analysis of existing technical solutions and mathematical models describing the behavior of the aircraft in the air was carried out. The MPC-method functioning algorithm is presented, which is the basis of the control scheme for dynamic objects. A dynamics system was chosen for a fixed-wing UAV, which allows to qualitatively maintain the roll angle close to zero degrees. The solution of optimization tasks using a predictive model is considered. According to the **results** of the study, the characteristic of transient processes for the third-order control system was obtained.

Keywords: UAV, aircraft, roll angle, automatic control system, MPC-method, predictive model, transfer function, optimization.

М. Ю. Заліський, О. А. Щербина, Л. Ю. Терещенко, А. О. Осіпчук, О. Б. Жарова, П. О. Станко
Національний авіаційний університет, Київ, Україна

МЕТОД ПОБУДОВИ ТІНЬОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ РЕНГЕНІВСЬКИХ СИСТЕМ АВІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Анотація. Стаття присвячена розробці метода побудови тіньових зображень об'єктів контролю рентгенівських інтроскопів та аналізу його застосування для розпізнавання небезпечних та заборонених предметів на зображеннях багажу. Відомо, що безпека авіації значним чином визначається заходами з забезпечення авіаційної безпеки. Для цього використовуються радіоелектронні системи та комп'ютеризовані комплекси доглядової техніки. Це обладнання включає рентгенівські інтроскопи, металодетектори та металошукачі, сканери тіла, газоаналізатори тощо. Обладнання доглядової техніки використовується для виявлення не-безпечних та заборонених предметів у пасажирів та в їхньому багажу. Однією із основних проблем при цьому слід вважати високу ймовірність хибної тривоги під час виявлення небезпечних предметів рентгенівськими системами. У деяких випадках ця ймовірність може складати 0,3, що негативно впливає на пропускну здатність пасажиропотоку аеропортів. З метою усунення вказаного недоліку в цій статті наводиться детальний опис нових технологій виявлення небезпечних предметів на основі використання проєкційних тіньових зображень об'єктів контролю. Запропонований метод побудови тіньових зображень ґрунтується на використанні правила подібності трикутників, теореми Піфагора, теореми синусів і косинусів та формул для визначення тригонометричних функцій кутів прямокутного трикутника. Пояснення методу отримання тіньових зображень виконується на прикладі об'єкту контролю у вигляді циліндра. При цьому спочатку наводиться стандартна методика визначення математичної моделі тіні у одній площині сканування. Далі використовуються розроблений метод сканування, який передбачає прямий та обернений перехід до циліндричної та декартової систем координат. Отримані математичні моделі тіньових зображень простої форми використовуються для побудови моделей складної форми, які можуть вважатися моделями заборонених та небезпечних об'єктів доглядового контролю. Метод отримання тіньових зображень є складовою методичного базису для синтезу спектрального виялювача. Алгоритм виявлення передбачає знаходження просторового перетворення Фур'є від тіньового зображення з подальшою згортою зі спектром маски шуканого забороненого чи небезпечного предмету. Запропонований виялювач використовує правило прийняття рішення на основі критерію Неймана-Пірсона. У статті виконано аналіз результатів моделювання виялювача для розпізнавання пістолету на зображеннях багажу. Для аналізу ефективності виявлення розраховано відповідну характеристику виявлення. Аналіз довів ефективність спектрального виялювача з точки зору статистичних характеристик. При цьому під час розпізнавання пістолету ймовірність правильного виявлення складає 0,99997, а ймовірність хибної тривоги – 0,01. Результати дослідження можуть бути використані для автоматизації процесів догляду пасажирів та багажу.

Ключові слова: авіаційна безпека, рентгенівські інтроскопи, тіньові зображення, обробка зображень, спектральний виялювач, критерій Неймана-Пірсона.

Вступ

Забезпечення безпеки є головним завданням для цивільної, військової та комерційної авіації. Безпека визначається як стан, за якого ризики авіаційних подій знижуються та контролюються до прийняттого рівня [1]. Авіаційну безпеку можна розглядати як динамічний стохастичний процес [2], який залежить від багатьох факторів, включаючи організаційну структуру аеропорту, надійність авіаційного обладнання, людський фактор, експлуатаційні чинники, умови навколишнього середовища тощо.

Авіаційна безпека є важливою складовою безпеки авіації. Метою діяльності служб авіаційної безпеки є забезпечення авіаційної безпеки, ефективності роботи аеропортів цивільної авіації шляхом здійснення заходів щодо захисту від актів незаконного втручання відповідно до чинних правил, рекомендованої практики та процедур [3].

На основі системного підходу та аналізу Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) визначила основні загрози авіаційній безпеці:

- захоплення повітряних суден терористами та іншими злочинними елементами та диверсійні акти;
- незаконне перевезення небезпечних вантажів;

– небезпеки під час польотів повітряного судна з вини агресивних або психічно невідповідних пасажирів;

– застосування терористами ракет класу «земля-повітря»;

– незаконне перевезення ядерних та радіоактивних речовин;

– кібертероризм.

Основним завданням служби авіаційної безпеки є виявлення небезпечних і заборонених об'єктів під час перевірки пасажирів і багажу [4]. Для цього персонал служби авіаційної безпеки використовує різне обладнання: рентгенівську доглядову систему, сканери тіла, металодетектори, детектори рухомих іонів, детектори слідів вибухових речовин. Сучасні аеропорти використовують від трьох до п'яти рівнів догляду багажу. Догляд пасажирів здійснюється лінійним режимом. Рентгенівська доглядова система надає інформацію про внутрішню структуру предметів багажу та дає можливість виявити вибухові речовини, наркотики, вогнепальну, холодну зброю та інші небезпечні та заборонені предмети [5].

Аналіз літератури та постановка задачі. Відповідно до сучасних рекомендацій по будівництву аеропортів, передбачається, що весь багаж прохо-

дить автоматичний догляд за допомогою рентгенівських інспекційних систем. Однак на жаль, висока достовірність виявлення небезпечних предметів і матеріалів (імовірність правильного виявлення вище 0,99) також супроводжується високими рівнями ймовірності помилкової тривоги (ця ймовірність приблизно дорівнює 0,15...0,3) [5, 6].

Основними причинами досить високих рівнів ймовірності помилкових тривог є:

1. Залежність характеристики виявлення від якості отриманих зображень [7].

2. Недоліки у визначенні ймовірностних характеристиках технологій візуалізації та використовуваних алгоритмів розпізнавання небезпечних та заборонених об'єктів під час рентгенівського догляду [8].

3. Людський фактор [9].

4. Несправності, збої та відмови обладнання [10].

Використання автоматизованих технологій виявлення та розпізнавання небезпечних і заборонених об'єктів у процесі перевірки дозволяє операторам з авіаційної безпеки зосередитися на аспектах перевірки, а система виконує функції сканування, аналізу та виявлення заданих об'єктів у багажі [11]. У статті [12] представлено метод автоматизованого виявлення небезпечних об'єктів з використанням адаптованої неявної форми моделі сканування. Цей підхід використовує візуальний словник для виявлення небезпечних і заборонених об'єктів. Автори демонструють достатній рівень ймовірності помилкових тривог при виявленні бритв і сюрікенів (0,02 і 0,06 відповідно), але під час виявлення пістолетів рівень помилкових тривог високий (ймовірність дорівнює 0,18).

Сучасним інструментом розпізнавання небезпечних і заборонених об'єктів є використання глибоких згорткових нейронних мереж (CNN). Стаття [13] досліджує попередньо навчену CNN на основі парадигми навчання за перенесенням. Запропонований підхід показав ефективне виявлення пістолетів з низькою ймовірністю помилкової тривоги (в діапазоні 0,0021 ... 0,024 залежно від параметрів CNN). Аналіз ймовірнісних характеристик для виявлення різних об'єктів за допомогою CNN наведено в [14]. Існують деякі вдосконалення та модифікації CNN, як показано в [15]. Загалом CNN є ефективною та надійною технікою виявлення небезпечних і заборонених об'єктів [16], але вона потребує значної обчислювальної потужності.

Проведений аналіз показав, що рентгенівська система заснована на прямому методі візуалізації. Прямі методи візуалізації складаються з наступних операцій:

- опромінення об'єкту джерелом рентгенівського випромінювання;
- приймання розсіяного та послабленого випромінювання;
- перетворення отриманого випромінювання в електричний сигнал та обробка сигналу;
- перетворення електричного сигналу в оптичний [5].

Друга операція пов'язана з реконструкцією тіньових зображень. Тіньове зображення об'єкта контролює собою тінь об'єкта в рентгенівському діапазоні. Оскільки різні об'єкти поглинають рентгенівське випромінювання, тіньове зображення показує розподіл амплітуди рентгенівського випромінювання на екрані детектора після його проходження крізь об'єкт контролю.

Аналіз літератури також показує, що реконструкція тіньових зображень є перспективним напрямком, який, зокрема, спрямований на підвищення ефективності роботи систем рентгенівського скринінгу.

Математичний опис послабленого випромінювання об'єктів, які перевіряються за допомогою системи рентгенівського догляду, можна надати наступним чином:

$$\varphi(x, y) = \Psi(\vec{F}, \vec{G}, \vec{P}, \vec{I}), \quad (1)$$

де x і y – координати (абсцисата ордината) на екрані приймача; \vec{F} – параметр форми, який задає складність об'єкта контролю (може бути простою або складною); \vec{G} – геометричні параметри об'єкта контролю, які задають числове значення його розмірів; \vec{P} – фізичні параметри об'єкту контролю (щільність, коефіцієнт поглинання, коефіцієнт розсіювання та інші); \vec{I} – параметри нахилу об'єкта контролю відносно осей координат.

Метою цієї статті є математичний опис процесу визначення ослабленого випромінювання на детекторах рентгенівського інтроскопу та аналіз можливості використання цих математичних залежностей для вирішення задачі розпізнавання небезпечних і заборонених об'єктів.

Метод реконструкції тіньових зображень

Узагальнена структура доглядових систем включає джерела випромінювання, об'єкт контролю та приймальну частину. Приймальна частина складається з обладнання для обробки зображень і відображення інформації для операторів служби авіаційної безпеки. У блоці обробки формується інформація про тіньове зображення об'єкту контролю [10].

Об'єкт контролю розташовують між джерелом випромінювання та екраном на певній відстані [17]. У кожній точці екрана фіксується значення параметра випромінювання, що пройшло через об'єкт (амплітуда, поляризація та інші). Кожному значенню цього параметра відповідає певна яскравість оптичного зображення. У загальному випадку розподіл яскравості оптичного зображення також є тривимірною функцією і залежить від уявних координат (x, y, z) . У наступних аналітичних моделях розподіл яскравості оптичного зображення задається аналогічно просторовому розподілу реального параметра. Оскільки просторовий параметр є постійною величиною в межах певного об'єму, функція яскравості оптичного зображення в межах цього певного об'єму також є величиною постійною. Цей об'єм обмежений двовимірною функцією $\varphi'(x, y)$. Отримане оптичне зображення виводиться на монітор рентгенівської

доглядової системи і тому є двовимірним. Координати задають певну точку на екрані монітора. Отже, фактично яскравість зображення визначається двовимірною функцією $\varphi'(x, y)$.

Загалом, для підвищення ефективності роботи доглядової системи необхідно постійно вдосконалювати структуру обробки даних, оскільки:

- а) різноманітність об'єктів контролю постійно збільшується;
- б) об'єктивно виникають шуми різного походження;
- в) збільшується обсяг повітряного транспорту;
- г) скорочується час прийняття рішення щодо виявлення заборонених об'єктів [5].

В цих умовах актуальним стає питання використання нових теоретичних результатів у галузі обробки даних, зокрема статистичних і фільтраційних методів обробки сигналів. На етапі синтезу та аналізу структур обробки даних доцільно використовувати методи та засоби електронного та статистичного моделювання [18].

На рис. 1 наведено узагальнену структуру операторів обробки даних для рентгенівських скринінгових систем.



Рис. 1. Узагальнена структура операторів обробки даних для рентгенівських систем

Узагальнений методичний підхід до побудови тіньових зображень предметів різної форми включає наступні етапи:

1. Вибір типу джерела випромінювання та аналіз його фізичних особливостей, а також методу сканування. Наприклад, якщо джерело точкове, то хвиля має сферичний фронт, якщо джерело лінійне, то має циліндричний фронт.

2. Аналіз геометричних особливостей об'єкта контролю та його розташування відносно джерела випромінювання, формування векторів вхідних даних (розміри, відстань від джерела до об'єкта контролю, відстань від об'єкта контролю до екрана тощо).

3. Аналіз розповсюдження електромагнітного випромінювання через об'єкт контролю до приймачів (екран, детектори). Ці явища підкоряються рівнянню Бера-Ламберта та законам геометрії.

4. Формування тіньового зображення та його кодування в псевдоколірній шкалі.

Згідно з рівнянням Бера-Ламберта інтенсивність $|E|^2$ випромінювання, що поширюється в однорідному середовищі ($\alpha = \text{const}$), описується наступним виразом:

$$|E|^2 = E_0^2 \exp(-\alpha\Delta), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт поглинання матеріалу об'єкта контролю; Δ – відстань, на яку рентгенівські промені поширилися всередині об'єкта контролю; E_0^2 – інтенсивність випромінювання до попадання на об'єкт контролю.

Основні закони геометрії для побудови тіньових зображень включають:

- правила подібності трикутників,
- теорему Піфагора,
- теореми синусів і косинусів,
- формули для визначення тригонометричних функцій кутів прямокутного трикутника.

Розглянемо особливості визначення тіньових зображень найпростіших предметів. Нехай цей об'єкт – циліндр. Розташування циліндра в скринінговій системі показано на рис. 2.

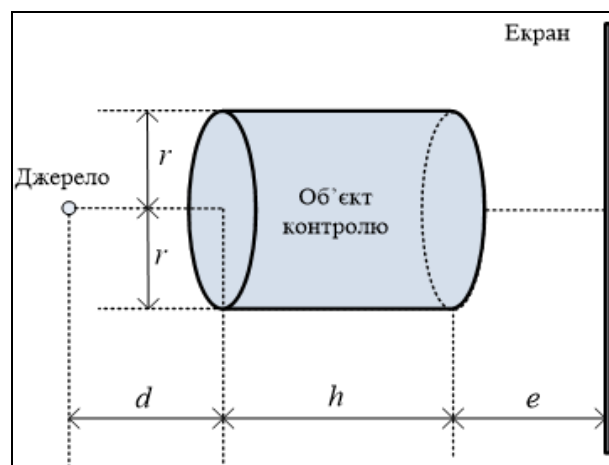


Рис. 2. Розташування циліндру в скринінговій системі

Вважаємо, що джерело випромінювання точкове. Циліндр має розміри радіус r та висоту h . Відстань між джерелом випромінювання та досліджуваным об'єктом дорівнює d . Відстань між об'єктом контролю та екраном приймача дорівнює e . Досліджуваный об'єкт має однорідну структуру, тому коефіцієнт $\alpha = \text{const}$. Пряма, що сполучає центр мас циліндра і джерело випромінювання, перпендикулярна до екрана, тобто ця пряма проходить через центральну вісь циліндра.

Щоб отримати загальне математичне рівняння для тіньового зображення, спочатку розглянемо формування тіньового зображення в одній площині, а потім використаємо метод сканування.

Проекція розташування циліндра на площину, перпендикулярну до осі ординат, зображена на рис. 3.

Вісь абсцис відповідає напрямку вниз на поверхні екрана. Початок системи координат розташований на поверхні екрана в точці O , до якої спрямо-

ваний перпендикуляр від джерела. Тіньове зображення буде описуватися парною функцією, тому розрахунок проводитиметься лише для додатних значень.

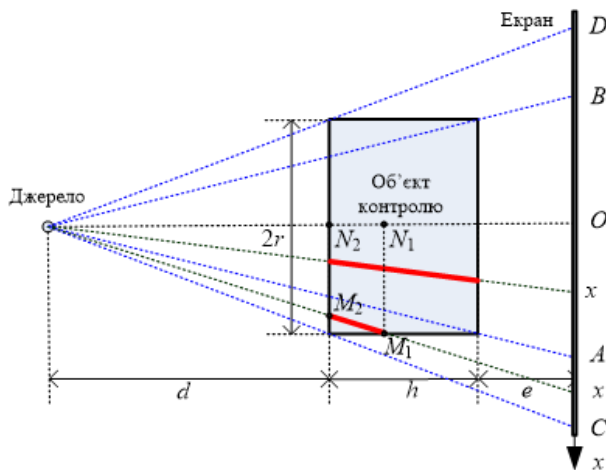


Рис. 3. Проекція розташування циліндра на площину, перпендикулярну до ординати

На першому етапі обчислень проведемо промені від джерела до вершин прямокутника (на рис. 3 вони позначені синіми пунктирними лініями). Очевидно, що $OA = OB$, $OC = OD$. За правилом подібності прямокутних трикутників можна записати пропорції

$$\frac{OA}{r} = \frac{d+h+e}{d+h} \text{ та } \frac{OC}{r} = \frac{d+h+e}{d}.$$

Тому

$$OA = \frac{r(d+h+e)}{d+h} \text{ та } OC = \frac{r(d+h+e)}{d}. \quad (3)$$

На другому етапі розрахунків проведемо два промені від джерела до екрана. Один промінь потрапляє в точку на відрізку OA , а інший – у точку на відрізку AC . Необхідно визначити відстані Δ всередині досліджуваного об'єкта (на рис. 3 вони позначені червоними відрізками).

Розглянемо перший промінь. Щоб визначити розглянутий відрізок, знайдемо гіпотенузу правого трикутника з вершинами в джерелі, точці O та точці h на відрізку OA

$$g = \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}.$$

За правилом подібності прямокутних трикутників можемо записати пропорцію

$$\frac{\Delta}{g} = \frac{h}{d+h+e}.$$

Звідси

$$\Delta = \frac{h}{d+h+e} \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}. \quad (4)$$

Розглянемо другий промінь. Прямокутний трикутник з вершинами в джерелі, точці O та точці h на відрізку AC має гіпотенузу

$$g = \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}.$$

За правилом подібності прямокутних трикутників можемо записати пропорції

$$\frac{h_1}{g} = \frac{r}{x} \text{ та } \frac{h_2}{g} = \frac{d}{d+h+e},$$

де h_1 – гіпотенуза прямокутного трикутника з вершинами в джерелі, точці M_1 та точці N_1 , h_2 – гіпотенуза прямокутного трикутника з вершинами в джерелі, точці M_2 та точці N_2 . Очевидно що

$$\Delta = h_1 - h_2 = \left(\frac{r}{x} - \frac{d}{d+h+e} \right) \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}. \quad (5)$$

З урахуванням рівнянь (3), (4) та (5), можемо визначити математичне рівняння тіні

$$\Delta(x) = \begin{cases} \frac{h}{d+h+e} \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}, & \text{якщо } |x| \leq \frac{r(d+h+e)}{d+h}, \\ \left(\frac{r}{|x|} - \frac{d}{d+h+e} \right) \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}, & \text{якщо } \frac{r(d+h+e)}{d+h} \leq |x| \leq \frac{r(d+h+e)}{d}, \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (6)$$

Для отримання остаточної математичної моделі тіньового зображення на екрані приймача розглянемо метод сканування, особливості якого показано на рис. 4.

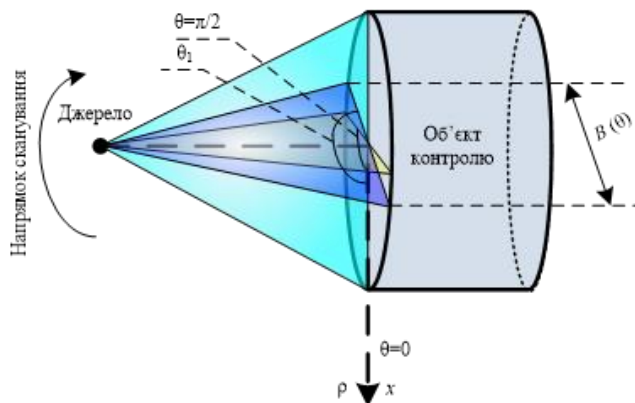


Рис. 4. Проекція розташування циліндра на площину, перпендикулярну до ординати

Процес сканування краще розглядати в циліндричній системі координат. Вісь абсцис збігається з віссю ρ . При цьому площа сканування змінюється в залежності від кута нахилу θ .

Перерізом циліндра при різних кутах нахилу θ є прямокутник зі стороною $B(\theta)$. Проекція розташування циліндра на площину для різних кутів нахилу θ буде такою ж, як на рис. 3, але замість $2r$ отримаємо $B(\theta)$. За визначенням функції косинус

$$B(\theta) = \frac{2r}{\cos \theta}. \quad (7)$$

Для зручності формування функцій зробимо зворотний перехід від циліндричної системи координат з аргументами ρ і θ до декартової системи координат з аргументами x і y . Цю операцію можна здійснити за допомогою відомих формул

$$\theta(x, y) = \arctg \frac{y}{x}, \quad \rho(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Використовуючи рівняння (6), (7) та пояснений метод сканування з переходом до циліндричної системи координат і зворотним переходом, після математичного спрощення кінцеве рівняння для тіньового зображення циліндра можна представити наступним чином:

$$\Delta(x, y) = \begin{cases} \frac{h}{d+h+e} \sqrt{x^2 + y^2 + (d+h+e)^2}, \\ \text{якщо } \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{r(d+h+e)}{d+h}, \\ \left(\frac{r}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{d}{d+h+e} \right) \sqrt{x^2 + y^2 + (d+h+e)^2}, \\ \text{якщо } \frac{r(d+h+e)}{d+h} \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{r(d+h+e)}{d}, \\ 0, \text{ у інших випадках.} \end{cases} \quad (8)$$

Рівняння (8) представляє зображення тіні в логарифмічному масштабі. Реальна величина тіньового зображення можна отримати за допомогою рівняння Бера-Ламберта (2), але у разі використання псевдокольорової шкали логарифмічна шкала дає більше можливостей для подальшого розпізнавання певних об'єктів. На рис. 5 показаний приклад тіньового зображення циліндра.

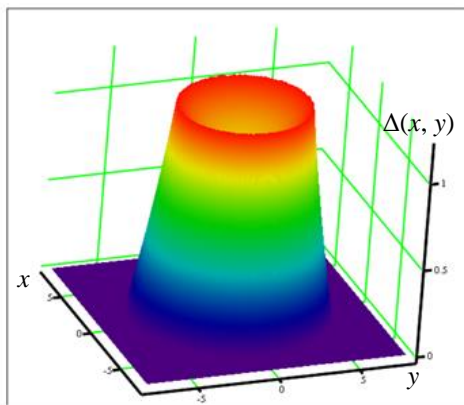


Рис. 5. Приклад тіньового зображення циліндра

За аналогічною методикою можуть бути отримані математичні моделі для тіньових зображень інших типів об'єктів контролю, зокрема паралелепіпеда, конуса, кулі, тора та інших геометричних фігур. Зазначені об'єкти є об'єктами простої форми. Їх комбінація та композиція можуть бути використані для отримання складних об'єктів, які можуть вважатися моделями заборонених та небезпечних об'єктів доглядового контролю.

Метод побудови тіньових зображень розроблений з метою синтезу нових технологій розпізнавання небезпечних предметів під час сканування багажу рентгенівськими інтроскопами.

У цій статті досліджено спектральний метод виявлення небезпечних предметів на прикладі пістолета. Блок-схема спектрального методу зображена на рис. 6.

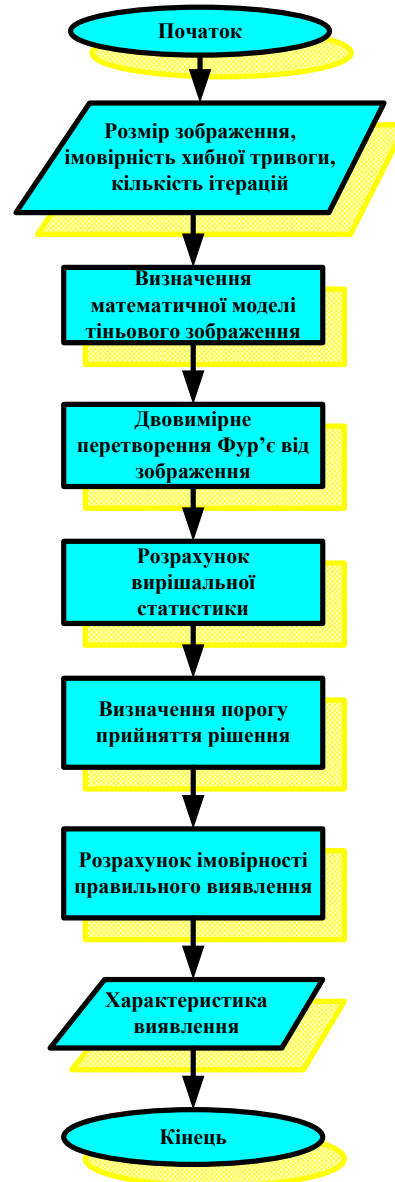


Рис. 6. Блок-схема спектрального методу виявлення пістолета

Початковою інформацією для аналізу методу розпізнавання є розмір зображення, кількість ітерацій і ймовірність хибної тривоги. Для спрощення розрахунків було обрано розмір зображення в пікселях. Кожен піксель містить інформацію про колір за допомогою 512 дискретних значень. Кількість ітерацій може бути довільною, але в цьому дослідженні було обрано 1000 ітерацій. Ймовірність α хибної тривоги була встановлена на рівні 0,01.

Першим кроком було отримання тіньових зображень пістолета, модель якого складається з тіней трьох об'єктів: 1) паралелепіпеда (для зображення

рукоятки пістолета); 2) циліндра (для відображення ствола пістолета); 3) другого циліндра (для відображення дульного зрізу пістолета).

Оскільки матеріал пістолета не пропускає рентгенівське випромінювання, тінь від пістолета на зображенні відповідає максимальному рівню реакції. Тінь пістолета утворює зображення маски розміру 70×35 пікселів. Тіньове зображення пістолета випадковим чином накладається на зображення розміром 256×256 пікселів. Таким чином, було згенеровано випадкове розташування та орієнтацію пістолета на зображенні для кожної ітерації моделювання. Окрім того, для кожного пікселя зображення формується адитивний гаусівський шум.

Другим кроком є розрахунок просторових спектрів аналізованих зображень. Далі виконується розрахунок вирішальної статистики. Ця операція реалізується як згортка спектрів зображення маски, накладеного на таке зображення, яке має розмір

256×256 пікселів без шуму та досліджуване зображення. Поріг прийняття рішення обирається з метою отримання заданої ймовірності хибної тривоги.

Останнім кроком піл час розрахунку є обчислення ймовірності правильного виявлення та побудова характеристики виявлення. Зазначену ймовірність було розраховано як відношення рішень щодо наявності пістолета до загальної кількості ітерацій для різних значень амплітуди сигналу та шуму. Припущення про різні значення амплітуди сигналу є ідеалізованим і може бути використане лише для математичної моделі, оскільки тінь пістолета завжди має максимальну амплітуду. Тому оцінюване значення ймовірності правильного виявлення було вибрано для співвідношення сигнал/шум, що дорівнює 1. Для цього моделювання ймовірність правильного виявлення дорівнює 0,99997 (для 100000 ітерацій).

Характеристика виявлення пістолета показана на рис. 7.

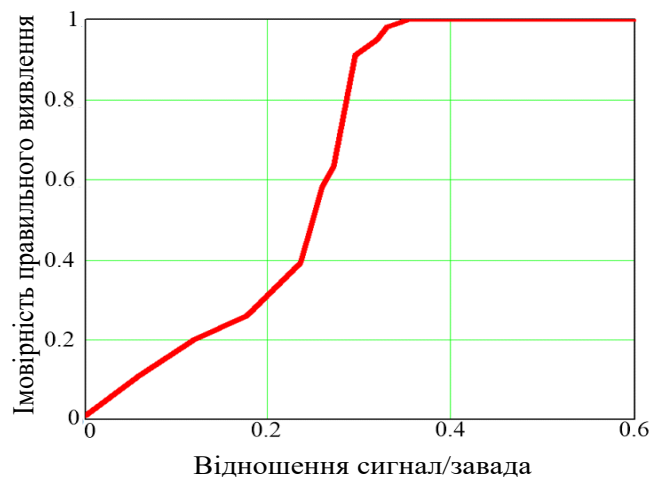


Рис. 7. Характеристика виявлення пістолету

Моделювання засвідчило такі переваги спектрального методу розпізнавання небезпечних і заборонених предметів:

1. Висока ефективність виявлення пістолета (ймовірність правильного виявлення дорівнює 0,99997, ймовірність хибної тривоги – 0,01).

2. Завдяки властивостям просторового спектру ефективність виявлення пістолета не залежить від положення, розташування та орієнтації пістолета на досліджуваному зображенні.

3. Висока швидкодія і низька вартість обчислювальних ресурсів.

Висновки

У статті розглядаються принципи обробки тіньових зображень при скануванні багажу рентгенівською системою. Математичні рівняння тіньових зображень отримані на основі базових законів геометрії та рівняння Бера-Ламберта з урахуванням обрної методики сканування. Ця стаття зосереджена на прикладі отримання математичних моделей тіньового зображення для циліндра. Тіньові зображення простих об'єктів можуть бути використані для опису складних небезпечних і заборонених предметів. За-

пропонований спектральний метод розпізнавання на основі інформації щодо внутрішньої структури об'єктів контролю за допомогою тіньових зображень дає можливість з високою ймовірністю виявляти небезпечні об'єкти в реальному часі, підвищує швидкість прийняття рішення щодо наявності небезпечних предметів у багажі та може сприяти автоматизації процесів догляду пасажирів та багажу.

Майбутні дослідження пов'язані з наступними напрямками:

– збір бази даних тіньових зображень простих і складних об'єктів;

– збір бази даних тіньових зображень небезпечних та заборонених об'єктів авіаційної безпеки;

– аналіз двовимірних просторових спектрів масок небезпечних і заборонених об'єктів;

– синтез алгоритмів спектрального виявлення різноманітних небезпечних і заборонених об'єктів на основі критерію Неймана-Пірсона та байєсівського підходу;

– аналіз ефективності методики розпізнавання за використанням тіньових зображень (оцінка ймовірності правильного виявлення та ймовірності помилкової тривоги).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Doc 9859. Safety Management Manual. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2018.
2. M. Chen, Y. Zhang and Y. Chen. Review on Civil Aviation Safety Investment Research. In 2016 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICRMS.2016.8050113.
3. Annex 17 to the Convention on Int. Civil Aviation, Security, Montreal: International Civil Aviation Organization, 2006.
4. L. Ji and Y. Mou. Research on the Feasibility of Application of Millimeter-wave Security Screening Equipment in Civil Aviation. In 2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), 2021, pp. 71–75. Doi: 10.1109/ICCASIT53235.2021.9633747.
5. Семенов О.О. Технічні засоби служби авіаційної безпеки. Київ: НАУ, 2013, 264 с.
6. D. Anderson. Optimising Multi-layered Security Screening. *Journal of Transportation Security*. Vol. 14, 2021, pp. 249–273. Doi: 10.1007/s12198-021-00237-3.
7. P. Gupta, Z. Sinno, J. L. Glover, N. G. Paulter and A. C. Bovik. Predicting Detection Performance on Security X-Ray Images as a Function of Image Quality. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 28, No. 7, 2019, pp. 3328–3342. Doi: 10.1109/TIP.2019.2896488.
8. S. Almazroui, W. Wang and G. Zhang. Imaging Technologies in Aviation Security. *European Journal of Applied Sciences*, Vol. 3, No. 4, 2015, pp. 12–27. Doi: 10.14738/aivp.34.1433.
9. J. Skorupski and P. Uchroński. A Human Being as a Part of the Security Control System at the Airport. *Procedia Engineering*, Vol. 134, 2016, pp. 291–300. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.010.
10. M. Zaliskyi. Reliability parameters estimation in case of aviation radio electronic devices technical state deterioration. *Electronics and Control Systems*, 2015, № 3 pp. 18–22.
11. R. Gesick, C. Saritac and C.-C. Hung. Automatic Image Analysis Process for the Detection of Concealed Weapons. In Proceedings of the 5th Annual Workshop on Cyber Security and Information Intelligence Research Cyber Security and Information Intelligence Challenges and Strategies, 2009, pp. 1–12. Doi: 10.1145/1558607.1558630.
12. V. Riffo and D. Mery. Automated Detection of Threat Objects Using Adapted Implicit Shape Model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems*, Vol. 46, No. 4, 2016, pp. 472–482. Doi: 10.1109/TSMC.2015.2439233.
13. S. Akçay, M. E. Kundegorski, M. Devereux and T. P. Breckon. Transfer Learning Using Convolutional Neural Networks for Object Classification within X-ray Baggage Security Imagery. In 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2016, pp. 1057–1061. Doi: 10.1109/ICIP.2016.7532519.
14. B. Gu, R. Ge, Y. Chen, L. Luo and G. Coatrieux. Automatic and Robust Object Detection in X-Ray Baggage Inspection Using Deep Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 68, No. 10, 2021, pp. 10248–10257. Doi: 10.1109/TIE.2020.3026285.
15. Y. F. A. Gaus, N. Bhowmik, S. Akçay, P. M. Guillén-Garcia, J. W. Barker and T. P. Breckon. Evaluation of a Dual Convolutional Neural Network Architecture for Object-wise Anomaly Detection in Cluttered X-ray Security Imagery. In 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2019, pp. 1–8. Doi: 10.1109/IJCNN.2019.8851829.
16. J. Zhang, X. Song, J. Feng and J. Fei. X-Ray Image Recognition Based on Improved Mask R-CNN Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2021, pp. 1–14, doi: 10.1155/2021/6544325.
17. A. K. Shukla. *Medical Imaging Methods: Theory and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2022, 200 p.
18. R. Alberts. *Modeling and Control of Image Processing for Interventional X-Ray*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010, 202 p.

Received (Надійшла) 25.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.02.2023

**Method for building shadow images
of the inspected objects using X-ray system of aviation security**

M. Zaliskyi, O. Shcherbyna, L. Tereshchenko, A. Osipchuk, O. Zharova, P. Stanko

Abstract. The article is devoted to the development of a method for constructing shadow images of control objects of X-ray introsopes and the analysis of its application for the recognition of dangerous and prohibited items on baggage images. It is known that aviation security is significantly determined by measures to ensure aviation security. For this, radio-electronic systems and computerized complexes of screening equipment are used. This equipment includes X-ray introsopes, metal detectors and metal detectors, body scanners, gas analyzers, etc. Screening equipment is used to detect dangerous and prohibited items from passengers and their luggage. One of the main problems with this is the high probability of false alarms when dangerous objects are detected by X-ray systems. In some cases, this probability can be as high as 0.3, which negatively affects the passenger capacity of airports. In order to eliminate this shortcoming, this article provides a detailed description of new technologies for detecting dangerous objects based on the use of projection shadow images of control objects. The proposed method for constructing shadow images is based on the use of the triangle similarity rule, the Pythagorean theorem, the theorem of sines and cosines, and formulas for determining the trigonometric functions of the right triangle angles. The explanation of the method for obtaining shadow images is made on the example of a control object in the cylinder form. In this case, the standard method for determining the mathematical model of the shadow in one scanning plane is first presented. Next, the developed scanning method is used, which provides for direct and inverse transition to cylindrical and Cartesian coordinate systems. The resulting mathematical models of shadow images of a simple form are used to build models of complex shape, which can be considered as models of prohibited and dangerous objects of control. The detection algorithm involves finding the spatial Fourier transform of the shadow image, followed by convolution with the spectrum of the mask of the desired forbidden or dangerous object. The article analyzes the results of modeling a detector for recognizing a handgun on luggage images. To analyze the detection efficiency, the corresponding detection characteristic is calculated. The analysis showed the effectiveness of the spectral detector in terms of statistical characteristics. In this case, when recognizing the handgun, the probability of correct detection is 0.99997, and the probability of a false alarm is 0.01. The results of the study can be used to automate the processes of screening passengers and baggage.

Keywords: aviation security, X-ray system, shadow images, image processing, spectral detector, Neyman-Pearson criterion.

Ю. В. Іваненко, О. С. Ляшенко, Т. В. Філімончук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ОГЛЯД МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Анотація. Актуальність. Протягом останніх десятиліть зі стрімким розвитком комп'ютерних технологій та технологій автоматичного управління, дослідження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) привернули до себе велику увагу з усього світу. Зокрема, через попит на різні цивільні застосування, концептуальний дизайн БПЛА і технології автономного управління польотами взаємно просуваються і розвиваються. **Метою даної роботи** є структурування методів керування безпілотними літальними апаратами та дослідження їх принципів роботи. **Об'єктом дослідження** є процес керування БПЛА, архітектура та програмне забезпечення цих апаратів. **Предметом дослідження** є методи керування безпілотними літальними апаратами. **Результати.** У даній роботі проведено аналіз питань керування БПЛА, включаючи математичну модель квадрокоптера та різні підходи до керування. Проілюстровано та обговорено основні ідеї, умови використання, переваги та недоліки цих методів. Розглядаються майбутні напрямки досліджень в цій галузі. **Висновок.** Визначені методи керування та їх архітектурні складові планується використовувати при розробці дрона для цивільних потреб та подальших досліджень у цій сфері.

Ключові слова: методи керування, безпілотний літальний апарат, пілотажний метод, навігаційний метод, автоматичний метод.

Вступ

Постановка проблеми. Технологічні інновації призвели до появи безпілотних літальних апаратів. БПЛА – це літальний апарат, який може літати без людини-пілота на борту.

За останні роки популярність БПЛА надзвичайно зросла. Крім того, вже більше десяти років спостерігається збільшення кількості нових застосувань цих апаратів. Спочатку БПЛА використовувалися для військової розвідки, спостереження, збору розвідувальної інформації та захоплення цілей. Проте, розвиток глобальної системи позиціонування (GPS), електроніки, двигунів і мікроконтролерів спонукав виробників створювати легші і дешевші дрони. Тепер дрони широко використовуються для багатьох невійськових цілей, таких як оцінка врожаю, дослідження клімату та навколишнього середовища, надання першої медичної допомоги, туризм, моніторинг дорожнього руху і погодних умов тощо [2].

Багато дослідників працювали над побудовою БПЛА, які працюють автономно. Розвиток автономних польотів призвів до прориву в теорії управління і зробив величезний внесок у літературу. З роками квадрокоптери стали важливою платформою для досліджень і розробок БПЛА [3]. Система керування польотом є фундаментальним аспектом квадрокоптера. Крім того, проблеми, які необхідно враховувати при дослідженні конструкції системи керування квадрокоптера – це складні нелінійні динамічні рівняння руху, багато входні-багато вихідні характеристики динамічних рівнянь, зв'язані підсистеми, динамічні невизначеності, вітрові збурення і т.п. [4]. Таким чином для покращення характеристик при побудові БПЛА потрібно чітко орієнтуватися в архітектурі та в методах керування, які можна застосувати до таких апаратів. Ця оглядова стаття підсумовує останні стратегії управління, що застосовуються до БПЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання керування безпілотними літальними апаратами часто розглядається дослідниками. Робіт і досліджень багато [1-16]. У роботах автори розглядають

методи основані на лінійні квадратичні регуляторах, пропорційно-інтегральних похідних, регуляторах з ковзним режимом та ін. Для простішого розуміння виникає необхідність упорядкувати цю інформацію в загальну стратегію управління. Тому виникає потреба проаналізувати та структурувати базові питання методів керування БПЛА.

Метою цієї роботи є проведення аналізу різних методів керування БПЛА та дослідження принципу їх роботи і використання, ґрунтуючись на архітектурі таких апаратів.

Основна частина

Архітектура побудови безпілотних літальних апаратів може бути різною, залежно від вимог і поставлених завдань.

Як показує досвід розроблення безпілотних літальних апаратів, у контексті керування БПЛА існують два основні елементи. Перший – виконавчий, тобто це сам планер із силовою установкою і рульовим механізмом. Другий – командний. Це той елемент, який ставить завдання на політ, ухвалює рішення, якщо є необхідність змінити програму польоту, виконує корекцію руху літального апарата в разі його відхилення від заданої траєкторії руху [4].

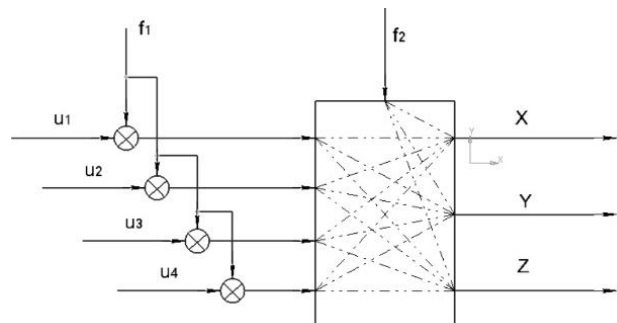


Рис. 1. Структурна схема дрона, як об'єкта керування

Під час побудови комплексу управління БПЛА командний елемент або його частина виноситься за межі апарата і зв'язується з виконавчим елементом лінійною передачею.

Найбільші труднощі виникають під час розроблення системи керування. Це пов'язано з тим, що БПЛА повинен виконувати завдання в умовах автономного польоту, отже, мати повну функціонально замкнуту систему керування (СК). У зв'язку з цим СК повинна вирішувати такі завдання:

- стабілізація параметрів руху об'єкта відносно зовнішніх перешкод різної природи;
- аналіз зовнішніх даних бортовими засобами і визначення пріоритетної мети залежно від поставленого перед БПЛА завдання;
- розрахунок оптимальної траєкторії руху з метою зменшення часу руху і витрати ресурсів БПЛА;
- контроль правильності утримання траєкторії;
- забезпечення відмовостійкості об'єкта управління або компенсація змін його характеристик бортовими засобами;
- виконання обчислювальних операцій великого обсягу в реальному масштабі часу для реалізації алгоритмів керування БПЛА [3].

Слід підкреслити, що основною функцією, яку розв'язує СК, є керування рухом центру мас (три канали керування) і кутовими рухами БПЛА щодо центру мас (три канали керування).

Для того, щоб наочно описати рух моделі квадрокоптера, необхідно вибрати координати положення. Модель квадрокоптера в цій роботі задається каркасом корпусу B і землею E , як показано на рис. 2. Нехай вектор $[x, y, z]'$ позначає положення центру ваги квадрокоптера, а вектор $[u, v, w]'$ – лінійну швидкість у системі координат. Вектор $[p, q, r]'$ – кутова швидкість квадрокоптера, m – загальна маса, g – прискорення сили тяжіння, l – відстань від центру кожного ротора до центру гравітації [7].

Якщо не потрібно точно витримувати рух літального апарата за заданою траєкторією, то керують тільки його кутовими рухами.

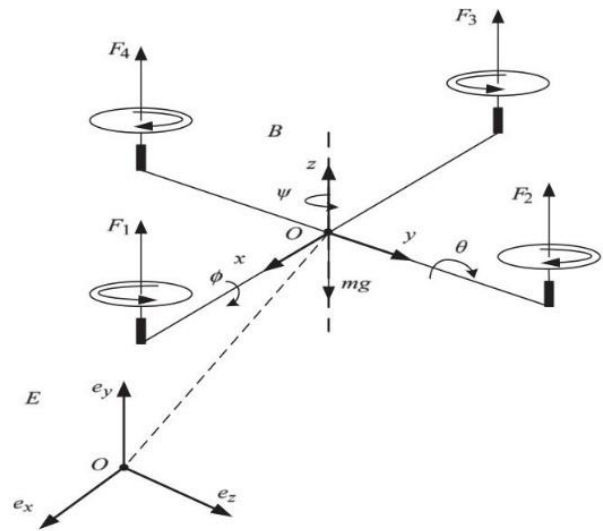


Рис. 2. Базова модель квадрокоптера [7]

Управління кутовими рухами забезпечує цілком певне положення БПЛА в просторі щодо вектора швидкості центру мас. Управління рухом центру мас забезпечує політ за найкращою (оптимальною) траєкторією, наприклад, за найкоротшим шляхом за найкоротший час.

Таким чином, управління польотом БПЛА зводиться до управління параметрами його руху: кутовими координатами, кутовими швидкостями і прискореннями, лінійними координатами (дальністю, висотою, бічним переміщенням) тощо.

Існуючі СК поділяють на автономні та неавтономні. Крім того, в окрему групу можуть бути виділені комбіновані СК [5].

Особливістю автономних є те, що сигнали керування рухом виробляються апаратурою, повністю розташованою на борту, причому ця апаратура після запуску не отримує жодної інформації з пункту керування. Автономні СК діють за заздалегідь визначеною програмою.



Рис. 3. Приклад наземного пункту керування [3]

Під час використання автономних систем існує два методи отримання керівних сигналів. Можна заздалегідь перед стартом розрахувати, як мають змінюватися в часі основні параметри руху БПЛА (швидкість, кут тощо), що визначають траєкторію руху.

Отримані функції часу вводяться в спеціальні пристрої СК як задані величини або програми.

Після старту в процесі польоту БПЛА відповідними пристроями безперервно змінюються поточні (дійсні) значення зазначених параметрів. СК здійс-

ноє порівняння розрахункових значень параметрів із поточними значеннями і в разі їх нерівності виробляє відповідні сигнали керування.

Якщо на БПЛА встановлено апаратуру, що дає змогу вести безперервне вимірювання її координат у просторі, то автономне керування можна здійснити по-іншому. Координати, одержані від апаратури, автоматично вводяться в бортовий обчислювальний пристрій, який відповідно до заздалегідь закладеної програми обчислює величину сигналів управління. Отже, заздалегідь не задається певна траєкторія, а щоразу обчислюється залежно від поточних координат. При цьому передбачається, що координати об'єкта попередньо закладені в обчислювальний пристрій. На роботу таких СК не впливають штучно створені перешкоди. Це основна їхня перевага. Крім того, ці системи можна застосовувати для керування БПЛА з великою дальністю польоту [8].

Визначення власних координат повітряним судном відбувається щомиті за стандартної роботи приймача супутникової навігаційної системи (СНС). Під час перенаштування приймача частота визначення власних координат може бути збільшена. Практично збільшення частоти не дає виграшу в точності визначення координат, оскільки швидкість зміни координат накладає обмеження на маневре-

ність БПЛА. Характер руху протягом однієї секунди змінюється мало, і положення БПЛА можна досить точно розрахувати за його попереднім положенням, динамікою польоту і поточним маневром. У реальності стоїть завдання не тільки знати, де і в який час перебуває об'єкт, а й залежно від його місця розташування виробити відповідну реакцію.

Отже, ситуацію можна поділити на три умовні категорії. Перша – найпростіший випадок моніторингу. Завдання системи полягає у фіксації місця розташування об'єкта з прив'язкою до часу. Друга – це розширення першої. Причому, на додаток до спостереження, система виробляє всередині себе відповідну реакцію (сигналізацію, набір обчислювальних процедур, вироблення внутрішньої команди). У цьому випадку час на вироблення відповідної реакції і на її виконання мізерно малий порівняно з дискретністю відліку місця розташування об'єкта. Третя категорія – передача обчислених у другому випадку даних назад на борт літального апарата. Наприклад, з метою корекції його руху. А даному випадку враховуються час передавання координат із літального апарата на пункт спостереження, вироблення команди і передавання команди назад на борт апарата.

Одним із методів керування БПЛА є пілотажний (рис. 4).

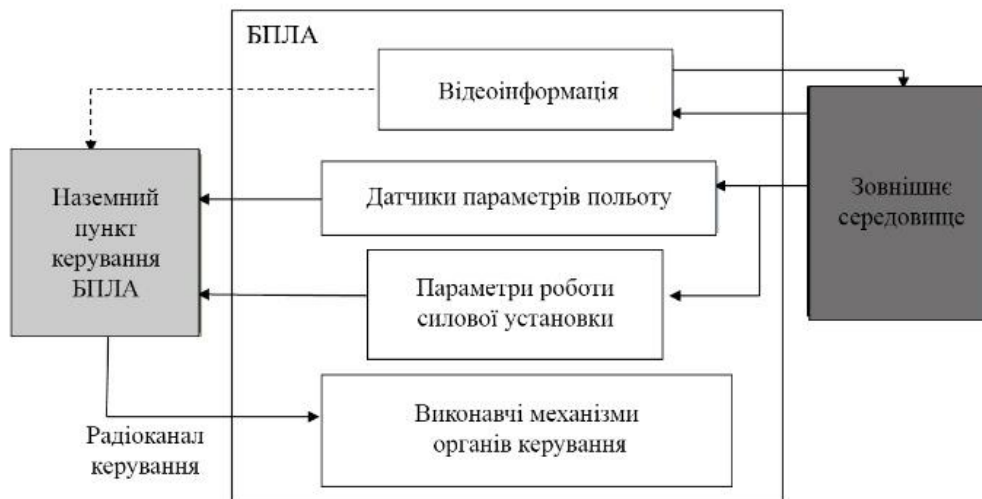


Рис. 4. Структура пілотажного методу керування БПЛА

У цій ситуації управління виконується безпосередньо виконавчими механізмами планера. З пункту управління передаються задані кути відхилення рульових аеродинамічних площин і режими роботи силової установки. Для БПЛА з високошвидкісними характеристиками і високою маневреністю потрібне дуже швидке доставлення команд управління з пункту керування на борт. Одночасно з цим пілотажне управління вимагає високого ступеня втручання оператора в процес управління літальним апаратом, що, своєю чергою, вимагає високої концентрації оператора, а також високого ступеня підготовки [8].

Наступний метод керування називається навігаційним (рис. 5).

Керування БПЛА здійснюється не передачею йому команд для виконання маневрів, а шляхом

завдання точок маршруту щодо земної поверхні. Цей спосіб керування вимагає перенесення частини обчислень із пункту керування на борт БПЛА.

Усі обчислення з виявлення відхилень у русі від заданої траєкторії виконуються вже на борту. Відповідно, ще більше знімається навантаження з радіолінії. По ній передаються тільки зміни навігаційної програми (зміна маршруту руху щодо раніше запланованого). У цьому разі в разі виникнення будь-яких відхилень від заданої траєкторії навігаційний обчислювач здатний сам, без участі зовнішнього пункту управління, виробити набір команд для корекції руху.

Однак таке керування підвищує вимоги до апаратури навігаційного обчислювача (до пам'яті, продуктивності та програмного забезпечення).

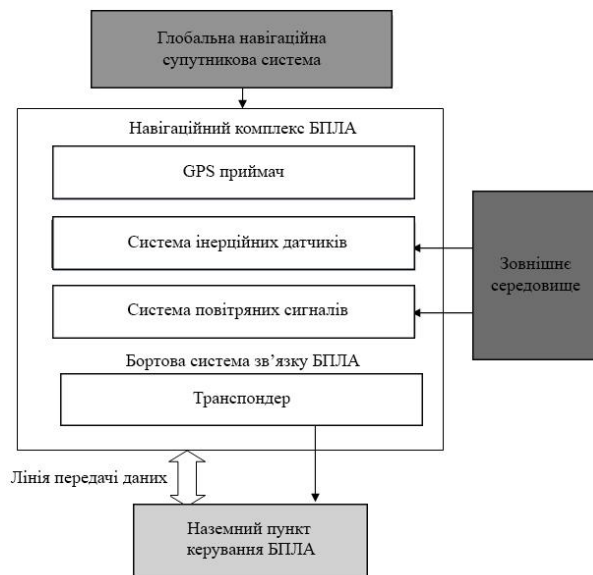


Рис. 5. Структура навігаційного методу керування БПЛА

У такому разі до складу бортового комплексу навігації та керування мають входити:

- приймач супутникової навігації, що забезпечує приймання навігаційної інформації від системи GPS;
 - система інерціальних датчиків, що забезпечує визначення орієнтації та параметрів руху БПЛА;
 - система повітряних сигналів, що забезпечує вимірювання висоти і повітряної швидкості;
 - апаратура лінії передачі даних, різні види антен, призначені для виконання завдань.
- Бортова система навігації та управління забезпечує:
- політ за заданим маршрутом (завдання маршруту проводиться із зазначенням координат і висоти поворотних пунктів маршруту);
 - зміну маршрутного завдання або повернення в точку старту за командою з наземного пункту управління;
 - обліг зазначеної точки;
 - автосупровід обраного об'єкта;
 - стабілізацію кутів орієнтації БПЛА;
 - підтримання заданих висот і швидкості польоту (шляхової або повітряної);
 - збір і передачу телеметричної інформації про параметри польоту і роботу цільового обладнання;
 - програмне управління пристроями цільового обладнання.

Бортова система зв'язку:

- функціонує в дозволеному діапазоні радіочастот;
- забезпечує передавання даних з борту на землю і з землі на борт.

Дані, що передаються з борту на землю:

- параметри телеметрії;
- потокове відео- і фотозображення.

Дані, що передаються на борт, містять:

- команди керування БПЛА;
- команди керування цільовою апаратурою.

Інформацію, отриману з БПЛА, потрібно класифікувати залежно від ступеня загрози. Класифікація

проводиться оператором, або безпосередньо бортовим комп'ютером (автопілотом) БПЛА. У другому випадку програмне забезпечення комплексу містить елементи штучного інтелекту, і потрібно виробити кількісні критерії та градації рівнів загрози. Такі критерії можуть бути сформульовані шляхом експертних оцінок і формалізовані таким чином, щоб мінімізувати ймовірність помилкового сигналу тривоги [9].

Третій метод управління БПЛА – це автоматичний (рис. 6).

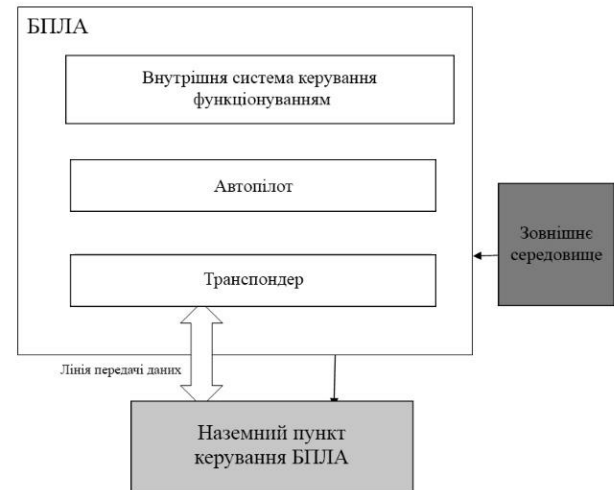


Рис. 6. Структура автоматичного методу керування БПЛА

Для його використання має бути створена внутрішня система управління функціонуванням БПЛА. Вона призначена для реалізації алгоритмів функціонування внутрішніх систем і пристроїв літального апарата для досягнення мети завдання і фактично реалізує локальні функції управління в повітряному просторі.

Висновки

Останнім часом застосування БПЛА у військовому та цивільних секторах стрімко зростає завдяки їх гнучкості та універсальності. Тим не менш, під час польоту або виконання завдань виникають певні проблеми, які необхідно враховувати і вирішувати. Ці проблеми включають динамічні невизначеності, збурення навколишнього середовища, недостатнє спрацьовування і сильно пов'язану нелінійну динамічну модель. Як наслідок, розробка ефективних і надійних механізмів керування для динамічної системи квадрокоптера є критично важливою.

У цій роботі обговорюється огляд різних підходів до керування, що застосовуються для БПЛА. Методи керування мають свої унікальні переваги, обмеження та алгоритми.

Визначені методи керування та їх архітектурні складові планується використовувати при майбутній розробці БПЛА для цивільних потреб та подальших досліджень у цій сфері.

Практичність базових методів управління польотом збільшила очікування людей щодо їхнього використання в більш суспільних сферах і цивільному повітряному просторі. З одного боку, БПЛА можуть запропонувати величезний потенціал для застосування в міському середовищі – від моніторингу інфраструк-

тури до спостереження за дорожнім рухом, реагування на надзвичайні ситуації і доставки медичного вантажу. З іншого боку, складність і різноманітність завдань, а також невизначеність умов експлуатації ставлять додаткові вимоги до автономності, інтелекту і безпеки систем БПЛА, які можуть бути недосяжними для існуючих методів управління польотами.

Нещодавні досягнення в галузі машинного навчання і методів на основі даних, а також нові можливості зондування і сприйняття, що з'являються в робототехніці, вказують на перспективний технічний шлях до створення більш автономних і інтелектуальних систем БПЛА, дозволяючи їм вчитися на власному досвіді і сприймати навколишнє середовище.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. P. Liu, A. Y. Chen, Y. Huang, J. Han, J. L., Shih-Chung Kang, T. Wu, M. Wen, M. Tsai (2014), "A review of rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering", *Smart Structures and Systems*, – 2014. – С. 1065–1094, doi: <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065>.
2. Muhammad Maaruf, Magdi Sadek Mahmoud, Alfian Ma'arif (2022), "A Survey of Control Methods for Quadrotor UAV", *International Journal of Robotics and Control Systems* Vol. 2, No. 4, 2022, pp. 652-665, available at: <https://pubs2.ascee.org/index.php/ijrcs>.
3. Z. Li, X. Ma, and Y. Li, "Robust trajectory tracking control for a quadrotor subject to disturbances and model uncertainties," *International Journal of Systems Science*, vol. 51, no. 5, pp. 839–851, 2020, <https://doi.org/10.1080/00207721.2020.1746430>.
4. Z. Zuo, C. J. Liu, Q.-L. Han, and J. Song (2022), "Unmanned aerial vehicles: Control methods and future challenges", *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, vol. 9, no. 4, pp. 601–614. doi: 10.1109/JAS.2022.105410.
5. O. Mechali, L. Xu, Y. Huang, M. Shi, and X. Xie (2021), "Observer-based fixed-time continuous nonsingular terminal sliding mode control of quadrotor aircraft under uncertainties and disturbances for robust trajectory tracking: Theory and experiment," *Control Engineering Practice*, vol. 111, p. 104806, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104806>.
6. H. Mo and G. Farid (2019), "Nonlinear and adaptive intelligent control techniques for quadrotor uav – a survey", *Asian Journal of Control*, vol. 21, no. 2, pp. 989–1008, doi: <https://doi.org/10.1002/asjc.1758>.
7. J. Xiong, E. Zheng, "Position and attitude tracking control for a quadrotor UAV", *ISA (Instrum Soc Am) Trans*, 53 (3) (2014), pp. 725-731, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.01.004>.
8. B. J. Emran and H. Najjaran (2018), "A review of quadrotor: An underactuated mechanical system," *Annual Reviews in Control*, vol. 46, pp. 165–180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.10.009>.
9. M. Champion, P. Ranganathan Prakash, S. Faruque (2019), "UAV swarm communication and control architectures: a review", *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 7, available at: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/juvs-2018-0009>.
10. M. R. Cohen, K. Abdulrahim, and J. R. Forbes, "Finite-horizon lqr control of quadrotors on se2(3)," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5748–5755, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3010214>.
11. J. Schlagenhauf, P. Hofmeier, T. Bronnenmeyer, R. Paelinck, and M. Diehl, "Cascaded nonlinear mpc for realtime quadrotor position tracking," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 7026–7032, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.444>.
12. C.-C. Chen and Y.-T. Chen, "Feedback linearized optimal control design for quadrotor with multiperformances," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26 674–26 695, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057378>.
13. Z. Hou, P. Lu, and Z. Tu, "Nonsingular terminal sliding mode control for a quadrotor uav with a total rotor failure," *Aerospace Science and Technology*, vol. 98, p. 105716, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105716>.
14. B. J. Emran and H. Najjaran, "A review of quadrotor: An underactuated mechanical system," *Annual Reviews in Control*, vol. 46, pp. 165–180, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.10.009>.
15. Z. Wang and T. Zhao, "Based on robust sliding mode and linear active disturbance rejection control for attitude of quadrotor load uav," *Nonlinear Dynamics*, pp. 3485–3503, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07349-y>.
16. L.-X. Xu, H.-J. Ma, D. Guo, A.-H. Xie, and D.-L. Song, "Backstepping sliding-mode and cascade active disturbance rejection control for a quadrotor uav," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 6, pp. 2743–2753, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2990582>.
17. Martovytskyi V., Ivaniuk O. Approach to Building a Global Mobile Agent Way Based on Q-learning. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 3 (13). P. 43–51. doi: 10.30837/itssi.2020.13.043.

Received (Надійшла) 25.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.03.2023

A SURVEY OF CONTROL METHODS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

Yuliia Ivanenko, Oleksii Liashenko, Tetiana Filimonchuk

Abstract. Topicality. Over the past decades, with the rapid development of computer and automatic control technologies, research on unmanned aerial vehicles (UAVs) has attracted much attention from around the world. In particular, due to the demand for various civilian applications, UAV conceptual design and autonomous flight control technologies are mutually promoted and developed. **The goal of this work** is to structure the methods of controlling unmanned aerial vehicles and study their operating principles. **The object of research** is the process of UAV control, architecture and software of these vehicles. **The subject of research** is the methods of controlling unmanned aerial vehicles. **Results.** This paper analyzes the issues of UAV control, including the mathematical model of a quadrotor and various approaches to control. The main ideas, conditions of use, advantages and disadvantages of these methods are illustrated and discussed. Future directions of research in this area are considered. **Conclusions.** The identified control methods and their architectural components are planned to be used in the development of a drone for civilian needs and further research in this area.

Keywords: control methods, unmanned aerial vehicle, manual control method, navigation control method, automatic control method.

Г. С. Іващенко, А. С. Склярів, О. Ю. Барковська

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ГІБРИДНИЙ МЕТОД РІШЕННЯ ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ З УРАХУВАННЯМ ДОДАТКОВИХ ОБМЕЖЕНЬ

Анотація. **Актуальність.** У сучасному світі є потреба у застосуванні автоматизованих систем в області транспортної логістики, з метою заощадження ресурсів. При побудові шляху переміщення транспорту виникають проблеми знаходження оптимального маршруту з урахуванням додаткових обмежень, таких як вантажопідйомність транспортних засобів або часові вікна клієнтів. У зв'язку з цим є необхідність вдосконалення існуючих засобів вирішення задачі маршрутизації транспорту. **Метою даної роботи** є створення гібридного методу рішення задачі маршрутизації транспорту з урахуванням додаткових обмежень. **Об'єктом дослідження** є процес пошуку оптимальних маршрутів в умовах обмеження вантажопідйомності та врахування часових вікон. **Предметом дослідження** є алгоритми для рішення задач маршрутизації транспорту з урахуванням заданих обмежень. **Результати.** У даній роботі розглядаються особливості застосування гібридного підходу, заснованого на використанні генетичного та класичних алгоритмів, для вирішення задачі маршрутизації транспорту з урахуванням додаткових обмежень. Представлені результати експериментальних досліджень, що демонструють переваги та недоліки кожного з розглянутих алгоритмів для рішення поставленої задачі. **Висновок.** Найбільшу точність та швидкодюю забезпечує запропонований гібридний підхід на основі генетичного алгоритму та модифікованого жадібного алгоритму.

Ключові слова: граф, маршрут, задача маршрутизації транспорту, часові вікна, вантажопідйомність, жадібний алгоритм, метод гілок та меж, алгоритм збережень, генетичний алгоритм, кросовер, мутація.

Вступ

Процес економічного росту супроводжується підвищенням попиту на транспортно-логістичні послуги. Внаслідок цього, проблема вирішення задач маршрутизації транспорту (ЗМТ) стає все більш актуальною та затребуваною [1, 2].

Головною метою різновидів ЗМТ є побудова маршрутів для транспортних засобів, що обслуговують певну кількість клієнтів. ЗМТ є модифікацією та розширенням задачі комівояжера [1]. Відмінністю задачі маршрутизації від задачі комівояжера є наявність спеціальної вершини (депо), в яку можна під час проходження побудованого шляху повертатися без урахування обмеження на виконання умови одноразового відвідування вершини (точки маршруту). При використанні ЗМТ на практиці часто виникають додаткові обмеження для побудованих маршрутів, що вимагає вдосконалення існуючих математичних моделей та алгоритмів рішення [2].

ЗМТ відноситься до NP-повних задач, тому для графів з великою кількістю вершин використовують алгоритми, що ґрунтуються на різних евристичних та їх комбінаціях [3]. Евристичні алгоритми рішення ЗМТ зазвичай дозволяють знайти варіанти, що є лише наближенням до оптимального рішення, тож доцільним є вдосконалення цих алгоритмів.

Відомі класичні алгоритми по вирішенню ЗМТ. Алгоритм Кларка-Райта [4] заснований на процесі злиття дрібних маршрутів, доки є можливість зменшити сумарну вартість об'їзду. Метод гілок та меж [5] полягає в розбитті задачі на спрощені підзадачі, шляхом фіксування значення змінної розгалуження.

Для вирішення ЗМТ доцільним є використання підходів на основі засобів обчислювального інтелекту [6], зокрема, генетичних алгоритмів (ГА). В [7] показано, що ГА можуть бути застосовані для ЗМТ із складними обмеженнями або їх комбінаціями.

ГА можуть бути вдосконалені шляхом гібридизації з іншими підходами. Наприклад, використання спеціального оператора локального спуску, що заснований на чотирьох різних типах зміни порядку виконуваних кроків, дозволяє прискорити збіжність алгоритму [8], при умові використання цього оператора тільки для найкращих рішень у поточній популяції.

Реалізація ГА, запропонована в [9], використовує оператор схрещування ОХ та оператор мутації заснований на обміні місцями двох випадково обраних вершин. В [10] досліджуються способи кодування особин (варіантів маршрутів), запропонована схема кодування, заснована на випадкових ключах.

На основі аналізу сучасних наукових досліджень можна зробити висновок, що незважаючи на численні переваги, розглянуті методи вирішення задач маршрутизації транспорту мають недостатню точність у випадку великої розмірності [11] та мають ряд недоліків, які специфічні для окремих методів (можливість попадання у локальні мінімуми, передчасна збіжність та інші).

Метою цієї роботи є розробка гібридного методу рішення ЗМТ з обмеженням на вантажопідйомність та часовими вікнами, заснованого на поєднанні ГА та варіантів класичних алгоритмів, а також програмна реалізація розробленого методу та проведення експериментальних досліджень.

Постановка задачі

ЗМТ визначена у вигляді повного направленного графа $G = (V, H, c, t)$, де $V = \{0, 1, \dots, n\}$ – множина вершин. Кожна вершина з індексом $i \in V \setminus \{0\}$ відповідає клієнту, що має невід'ємний попит $d_i \leq Q$ та часове вікно $[a_i, b_i]$, а вершина 0 являє собою депо для p транспортних засобів з вантажопідйомністю Q . Матриця $H = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ описує множину дуг, що відповідає транспортній мережі між вузла-

ми. З кожною дугою пов'язана вартість переміщення c_{ij} та час переїзду t_{ij} , де $(i, j) \in H$. ЗМТ потребує визначення набору маршрутів m , сумарна вартість яких зводиться до мінімуму і така, що:

- кожен клієнт відвідується тільки один раз в одному маршруті;
- маршрути починаються та закінчуються в депо;
- загальна потреба клієнтів, що обслуговуються в одному маршруті, не перевищує пропускну здатність Q ;
- кількість маршрутів m не перевищує кількість транспортних засобів p ;
- обслуговування клієнта повинно здійснюватися в рамках його часового вікна.

Нехай бінарна змінна x_{rij} визначає переміщення транспортного засобу $r \in \{1, 2, \dots, p\}$ по дузі (i, j) в рішенні задачі, а τ_i – час початку обслуговування вершини i .

Математична модель ЗМТ з урахування додаткових обмежень може бути описана наступним чином. Мінімізація цільової функції:

$$\sum_{r=1}^p \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n c_{ij} x_{rij} \rightarrow \min. \quad (1)$$

З урахуванням умов:

$$\sum_{r=1}^p \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{rij} = 1, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^p x_{r0j} = 1, \forall r \in \{1, \dots, p\}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n d_j x_{rij} \leq Q, \forall r \in \{1, \dots, n\}, \quad (4)$$

$$a_i \leq \tau_i \leq b_i, \forall i \in n, \quad (5)$$

$$x_{rij} \in \{0, 1\}, \forall r \in \{1, \dots, p\}, i, j \in \{0, \dots, n\}, i \neq j. \quad (6)$$

Цільова функція (1) мінімізує загальну вартість перевезень. Обмеження моделі (2) забезпечує, щоб кожного клієнта відвідав тільки один транспортний засіб. Обмеження (3) гарантує, що кожен транспортний засіб може покинути депо тільки один раз. В (4) задається обмеження вантажопідйомності транспорту, тобто сума потреб клієнтів, що належать маршруту, повинна бути менше або дорівнювати вантажопідйомності транспортного засобу. Умова відвідування клієнту в межах відповідного часового вікна формалізована за допомогою обмеження (5). Вирази (6) визначають області значень змінних.

Гібридний метод на основі ГА для рішення ЗМТ з урахуванням обмежень

Для вирішення ЗМТ за допомогою ГА необхідно обрати спосіб кодування особин (рішень). Рішенням ЗМТ є сукупність маршрутів транспортних засобів для обслуговування усіх клієнтів, тож традиційно використовуване у ГА бітове представлення

особин пропонується замінити поданням у вигляді набору маршрутів, які описуються як ланцюги чисел, де кожне число позначає деяку вершину. Положення кожного числа в рядку відповідає порядку вершини в маршруті. Кожен маршрут окремого транспортного засобу починається та закінчується вершиною депо. Необхідно модифікувати генетичні оператори кросинговеру та мутації, для їх сумісності з обраним способом кодування варіантів рішень.

До основних проблем, що виникають при використанні ГА для рішення ЗМТ [12], можна віднести вибір способів кодування особин, початкових параметрів алгоритму (поточного та максимального розміру популяції, критеріїв зупинки), параметрів фітнес-функції, алгоритму для створення початкової популяції, типів мутації та схрещування особин.

Порядок роботи ГА для вирішення ЗМТ з урахуванням вантажопідйомності транспортних засобів та часових вікон наступний:

1. Створення початкової популяції з використанням обраного класичного алгоритму (гібридизація ГА з іншими алгоритмами).

2. Відбір особин з популяції для використання при генерації нового покоління.

3. Схрещування (виконання оператора кросовера), доки не буде отримана необхідна кількість нащадків відібраних особин.

4. До усіх особин у популяції з деякою ймовірністю застосовується кожна з обраних мутацій.

5. Збереження особини, що має найнижче значення фітнес-функції (є найкращим рішенням ЗМТ на поточній ітерації алгоритму). Формування нового покоління (множини варіантів рішень ЗМТ).

6. Якщо не досягнуто критерій зупинки, необхідно повернутися до пункту 2.

Для генерації початкової популяції використовуються такі класичні алгоритми, як жадібний алгоритм, метод гілок та меж та алгоритм Кларка-Райта. Також у дослідженні запропонований модифікований жадібний алгоритм, заснований на максимізації завантаження транспортних засобів, а не мінімізації вартості проїзду.

Використання жадібного алгоритму при створенні особин початкової популяції є доцільним з урахуванням подальшого його покращення у процесі роботи ГА. Для забезпечення різноманіття початкової популяції, серед заданої кількості переїздів з найкращою вартістю обирається один випадковим чином. Для врахування умови часових вікон на кожному етапі потрібно спочатку розглядати вершини для переміщення, для яких час обслуговування буде в межах часового вікна.

Метод гілок та меж – один з комбінаторних методів, який полягає в переборі та розгляді тільки тих варіантів, які є за певними ознаками корисними для знаходження оптимального рішення. При оцінці множин враховується вантажопідйомність транспорту та часові вікна клієнтів.

Алгоритм Кларка-Райта один з найвідоміших алгоритмів вирішення ЗМТ, основну роль в якому грає поняття «збереження» – зниження загальної вартості рішення, отримане при об'єднанні двох ма-

ршрутів (7). Дрібні маршрути зливаються у більші, спираючись на величину збереження, доки є можливість покращувати рішення.

$$saving_{ij} = c_{i0} + c_{0j} + c_{ij}. \quad (7)$$

Для злиття спочатку обираються маршрути, час обслуговування яких буде в межах часового вікна, а потім обираються в залежності від величини збереження. Алгоритм дозволяє знайти рішення наближене до оптимального за прийнятний час.

Модифікація жадібного алгоритму, заснована на максимізації завантаження транспортних засобів, працює наступним чином:

1. Оцінка мінімальної кількості транспортних засобів p_{min} , необхідної щоб вмістити вантаж, що потрібно доставити клієнтам.

2. Формування p_{min} маршрутів з вершин з найбільшими потребами, при цьому враховуються часові вікна.

3. Для кожної вершини, що залишилася, здійснюється спроба помістити її в один із сформованих маршрутів, шляхом виконання в них перестановки вершин, яка дозволить звільнити місце для вантажу, що потребує цей клієнт.

4. Якщо вершин не залишилося, алгоритм закінчує свою роботу та повертає сформоване рішення, інакше – повертається до пункту 1, але працює з множиною вершин, що не потрапили до жодного з сформованих маршрутів.

Вершини для перестановки у пункті 3 обираються за допомогою перебору. Це не створює значного додаткового обчислювального навантаження, так як більшість маршрутів не приймають участі у розгляді, бо не містять вершину, яка потенційно здатна звільнити місце для вантажу.

Для схрещування особин обрано оператор РМХ [13] та адаптовано його під нові умови. На кожній ітерації роботи алгоритму, оператор застосовується доки не буде отримано задану кількість особин. Вибір батьківських особин для схрещування відбувається за допомогою турнірного відбору.

Для внесення різноманіття у популяцію, а також для дослідження більшого діапазону можливих рішень, пропонується використовувати три види мутацій, що адаптовані під обраний спосіб кодування. Інверсна мутація та мутація випадкової перестановки вершин у межах одного маршруту дозволяють проводити пошук кращого локального рішення, що дозволяє зменшити витрати на переміщення між вузлами та досягти виконання умови часових вікон. Мутація обміну підмножин вершин (фрагментів маршрутів) між різними маршрутами у рамках однієї особини дозволяє розглядати рішення, що мають різну кількість маршрутів, покращувати наповнення транспортних засобів вантажем та шукати краще глобальне рішення з меншими витратами на переїзди. Кожна із мутацій застосовується до кожної особини в популяції з деякою заданою ймовірністю.

Для оцінки отриманих рішень використовується фітнес-функція, що враховує вартість переміщень у всіх маршрутах рішення, наповненість вантажем

транспортних засобів, виконання умови часових вікон та кількість маршрутів. Нехай $c_{заг}$ – загальна вартість переміщень у рішенні, $d_{віл}$ – загальний обсяг вільного місця у всьому транспорті, що використовуються, m – кількість маршрутів у рішенні, k – кількість вершин для яких обслуговування відбувається за межами часового вікна. Тоді фітнес-функція визначається як

$$f = c_{заг} \cdot C_{коеф.} + d_{віл} \cdot D_{коеф.} + mM_{коеф.} + kK_{коеф.}, \quad (8)$$

де $C_{коеф.}$, $D_{коеф.}$, $M_{коеф.}$, $K_{коеф.}$ – коефіцієнти, що впливають на значимість характеристик отриманого рішення при розрахунку фітнес-функції. Підбір коефіцієнтів фітнес-функції є важливим для правильної роботи алгоритму, необхідно враховувати початкові параметри та цілі, для яких вирішується задача (відносну важливість критеріїв оптимального рішення).

Для уникнення рішень, у яких кількість маршрутів більше заданого значення, використовується модифікований варіант фітнес-функції (8). Якщо кількість маршрутів не задовольняє заданим умовам, то фітнес-функція не проводить оцінку рішення, що дозволяє прискорити роботу ГА.

Для підвищення продуктивності роботи ГА реалізовані наступні оптимізації:

- на етапі створення початкової популяції варіантів рішень додана можливість створити перше рішення за допомогою обраного класичного алгоритму, а інші – клонувати з отриманого. Це значно підвищує швидкість при гібридизації з алгоритмами, що генерують одне й те ж саме рішення на однаковому наборі даних;

- алгоритм зберігає інформацію тільки про свої параметри, найкраще рішення за весь час та поточну популяцію. Це дозволяє використовувати менше пам'яті при роботі алгоритму.

Налаштування параметрів ГА для конкретних задач відбувається шляхом обчислювального експерименту.

Результати експериментальних досліджень

Для проведення експериментів були використані повнозв'язні графи, що складаються з 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500 та 1000 вершин.

Для ЗМТ були обрані наступні параметри:

- вантажопідйомність кожного транспортного засобу дорівнює 2000;

- вартість переміщення між двома вузлами лежить в діапазоні від 10 до 1000, матриця – асиметрична;

- потреби клієнтів у вантажі лежать в діапазоні від 250 до 1000;

- час переміщення між двома вузлами знаходиться в межах від 1 до 100;

- кожен клієнт має часові вікна, яке генерується у діапазоні від 10 до 200.

Для оцінки особин застосовується фітнес-функція з такими коефіцієнтами: $C_{коеф.} = 0.1$, $D_{коеф.} = 10$, $M_{коеф.} = 100$, $K_{коеф.} = 1$. Така комбінація коефіцієнтів забезпечує достатньо збалансовану оцінку рішень для ЗМТ з обраними параметрами.

ГА був налаштований наступним чином:

- для генерації початкової популяції використано жадібний алгоритм, метод гілок та меж, алгоритм Кларка-Райта та модифікований варіант жадібного алгоритму. Кількість початкових особин дорівнює 10;
- для схрещування застосовується кросовер PMX. Підмножина вершин кожен раз генерується випадково в межах діапазону від 2 до 5;
- вибір батьківських особин відбувається шляхом турнірного відбору з 3 учасників турніру;
- використовуються три типи мутації: інверсна, випадкова перестановка вершин в одному маршруті та обмін підмножин вершин між різними маршрутами. З ймовірністю 0.1, 0.1 та 0.4 відповідно.

В ході експериментальних досліджень застосування гібридного підходу на основі ГА в комбінації з різними алгоритмами, як показано на рис. 1, виявлено, що поєднання ГА з методом гілок та меж знаходить найгірші рішення у порівнянні з іншими. Це пов'язано з тим, що даний метод генерує початкову популяцію без достатнього різноманіття та пропонує рішення з великою кількістю маршрутів.

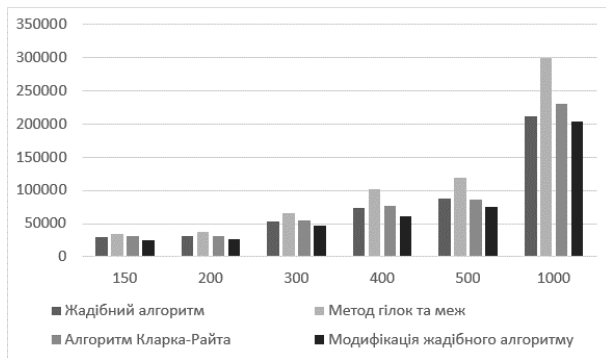


Рис. 1. Діаграма значень фітнес-функції для знайдених рішень на графах з різною кількістю вершин

Отриманий результат гібридизації ГА з алгоритмом Кларка-Райта пояснюється тим, що класичний алгоритм пристосований до симетричних матриць вартостей переміщення.

Результати комбінації ГА з жадібним алгоритмом забезпечуються різноманітністю початкової популяції, яка призводить до обстеження більшої області пошуку.

Найкращі рішення отримані за допомогою ГА на основі модифікації жадібного алгоритму, заснованої на максимізації завантаження транспортних засобів. Це пов'язано з тим, що початкова популяція складається з рішень, у яких кількість маршрутів наближена до мінімальної, при цьому вартість переміщення по ним може бути відносно вищою, ніж у інших розглянутих підходів. Це обумовлено тим, що для мінімізації кількості маршрутів при схрещуванні або мутації необхідно здійснити велику кількість таких перестановок вершин, що приведуть до зменшення кількості маршрутів. Для того, щоб зменшити вартість переміщень достатньо однієї або декількох змін з вершинами, тому ГА вирішує проблему з вартістю переїздів, як показано на рис. 2, після достатньої кількості ітерацій та знаходить рішення, що є наближеним до оптимального.

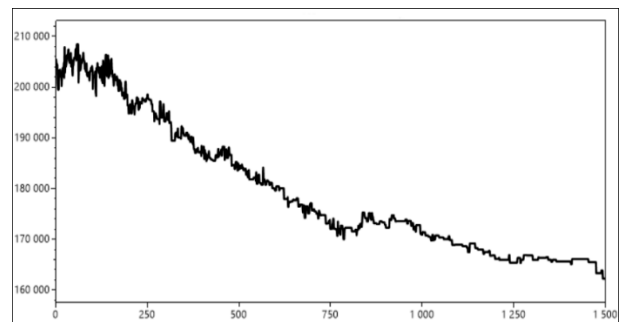


Рис. 2. Графік зміни середньої вартості переміщень при використанні гібридного методу на графі з 300 вершинами

В табл. 1 представлені результати порівняння застосування гібридного підходу на основі ГА з описаними класичними алгоритмами. Критеріями ефективності є час роботи алгоритму та значення фітнес-функції, яке враховує всі характеристики отриманого рішення. Результати фіксувалися при досягненні одного із критеріїв зупинки:

- алгоритм виконав 1500 ітерацій;
- алгоритм виконав 150 ітерацій без удосконалення поточного найкращого рішення.

Щоб уникнути викривлення результатів через випадкові значення, що використовуються в логіці алгоритмів, кожен алгоритм на кожному наборі даних запускався 5 разів, результуюче значення бралося як середнє арифметичне.

Таблиця 1 – Порівняння результатів застосування ГА з розглянутими класичними алгоритмами

Застосовані алгоритми для створення початкової популяції	Критерій ефективності	Кількість вершин									
		25	50	75	100	150	200	300	400	500	1000
Жадібний алгоритм	Час, с	3.64	4.99	6.36	7.97	11.41	14.39	21.79	30.65	38.75	86.72
	Оцінка	5243	9749	14789	16830	30112	31431	53723	73876	87635	211026
Метод гілок та меж	Час, с	3.71	5.07	6.64	8.7	11.75	15.85	24.36	34.69	44.94	129.62
	Оцінка	6962	9989	19725	18799	33723	37867	65392	101089	119636	299124
Алгоритм Кларка-Райта	Час, с	3.7	5.02	6.74	8.08	11.72	14.7	23.02	31.26	39.01	91.01
	Оцінка	7395	8880	17358	16596	30790	31350	55231	76029	86171	229837
Модифікація жадібного алгоритму	Час, с	3.65	4.89	6.35	7.7	11.2	14.38	21.22	29.49	38.2	83.73
	Оцінка	5251	7499	14089	12698	25270	26926	47321	60569	74777	203121

З наведеної таблиці випливає, що застосування гібридного підходу на основі ГА і модифікованого жадібного алгоритму дозволяє отримати кращі рішення за менший час, ніж в результаті інших розглянутих алгоритмів.

Висновки

В роботі запропонований гібридний підхід для рішення задачі маршрутизації транспорту, заснований на поєднанні генетичного та класичних алгоритмів. Найбільшу точність та швидкодню забезпечує гібридизація генетичного алгоритму та

модифікації жадібного алгоритму, заснованого на максимізації завантаження транспорту, у порівнянні з комбінаціями генетичних алгоритмів та інших алгоритмів.

В майбутньому доцільними є такі напрями розвитку розглянутого підходу:

- застосування декількох класичних алгоритмів одночасно для формування початкової популяції та забезпечення різноманіття;
- аналіз застосування різних видів кросовера, мутацій та інших стратегій відбору батьківських особин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aksen D., Zyurt Z., Aras N. (2006), "Open vehicle routing problem with driver nodes and time deadlines", Journal of the Operational Research Society, Vol. 58(9), pp. 106-114, doi: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602249>
2. Braekers K., Ramaekers K., Nieuwenhuise I. (2016), "The vehicle routing problem: State of the art classification and review", Computers & Industrial Engineering, Vol. 99, pp. 300-313, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
3. Caramia M., Guerriero F. (2010), "A heuristic approach for the truck and trailer routing problem", Journal of the Operational Research Society, Vol. 61(7), pp. 1168-1180, doi: <https://doi.org/10.1057/jors.2009.59>
4. Clarke G., Wright J.W. (1964), "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", Operations Research, Vol. 12, No. 4, pp. 568-581, doi: <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
5. Theurich F., Fischer A., Scheithauer G. (2021), "A branch-and-bound approach for a Vehicle Routing Problem with Customer Costs", EURO Journal on Computational Optimization, Vol. 9, pp. 29-40, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejco.2020.100003>
6. Кораблев Н.М., Иващенко Г.С., Кушнарєв М.В. (2012) "Агентно-ориентированный подход на основе искусственных иммунных систем для решения задачи коммивояжера", Біоніка інтелекту, №2(79), С. 33-37, available at: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/572>
7. Alvarez A., Munari P. (2017), "An exact hybrid method for the vehicle routing problem with time windows and multiple deliverymen", Computers & Operations Research, Vol. 83, pp. 1-12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.001>
8. Vidal T., Crainic T.G., Gendreau M., Prins C. (2013), "A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time windows", Computers & Operations Research, Vol. 40(1), pp. 475-489, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.07.018>
9. Mohammed M.A., Ghani M.K., Hamed R.I., Mostafa S.A., Ahmad M.S., Ibrahim D.A. (2017), "Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution", Journal of Computational Science, Vol. 21, pp. 255-262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.04.003>
10. Bean J. C. (1994), "Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization", ORSA Journal on Computing, Vol. 6, No. 2, pp. 154-160, doi: <https://doi.org/10.1287/ijoc.6.2.154>
11. Caceres-Cruz J., Arias P., Guimarans D., Riera D., Juin A. (2015), "Rich vehicle routing problem: Survey", ACM Computing Surveys (CSUR), Vol. 47(2), No. 32, pp. 1-28, doi: <https://doi.org/10.1145/2666003>
12. Alba E., Dorronsoro B. (2004), "Solving the vehicle routing problem by using cellular genetic algorithms", European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, Vol. 3004, pp. 11-20, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-24652-7_2
13. Cheng C., Wang K. (2009), "Solving a vehicle routing problem with time windows by a decomposition technique and a genetic algorithm", Expert Systems Applications, Vol. 36(4), pp. 7758-7763, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.09.001>

Received (Надійшла) 17.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.03.2023

A hybrid approach for solving the vehicle routing problem with additional constraints

Heorhii Ivashchenko, Artem Skliarov, Olesia Barkovska

Abstract. Topicality. In the modern world, there is a need to use automated systems in the transport logistics, in order to saving resources. When constructing a vehicle route, there are problems of searching the optimal route, taking into account additional constraints, such as the carrying capacity of vehicles or time windows of customers. In this regard, there is a need to improve the existing means of solving the vehicle routing problem. **The goal of this work** is to create a hybrid method of solving the vehicle routing problem with additional constraints. **The object of research** is the process of searching optimal routes with load capacity limitation and taking into account time windows. **The subject of research** is algorithms of solving vehicle routing problems with additional constraints. **Results.** In this paper, the features of the application of a hybrid approach based on the use of genetic and classical algorithms to solve the vehicle routing problem with additional constraints, are considered. The results of experimental studies demonstrating the advantages and disadvantages of each of the considered algorithms for solving the given problem are presented. **Conclusions.** The proposed hybrid approach based on the genetic algorithm and the modified greedy algorithm provides the highest accuracy and speed.

Keywords: graph, route, vehicle routing problem, time windows, carrying capacity, greedy algorithm, branch-and-bound algorithm, conservation algorithm, genetic algorithm, crossover, mutation.

В. В. Коломієць

Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ОКУЛЯРІВ НІЧНОГО БАЧЕННЯ ПЛОТОМ ВЕРТОЛЬОТУ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА БЕЗПЕКУ ПОЛЬОТІВ

Анотація. У статті розглянуто особливості використанні окулярів нічного бачення та визначено основні фактори, які впливають на рівень безпеки польотів при виконанні польотів у темний час доби, а також важливість технічних параметрів окулярів нічного бачення. У зв'язку зі стрімким розвитком окулярів нічного бачення, та вимог до якості їхнього функціонування основною задачею для забезпечення авіаційної безпеки польотів є якісне виконання адаптації світлотехнічного обладнання вертольотів, навчання екіпажів та дотримання усіх обмежень та застережень при виконанні завдань в темну пору доби як для існуючих, так і нових вертольотів різного призначення, до складу обладнання яких входять окуляри нічного бачення другого й наступних поколінь.

Ключові слова: адаптація світлотехнічного обладнання, окуляри нічного бачення, безпека польотів, внутрішньо-кабінна інформація, закабінна інформація.

Вступ

Постановка проблеми. Використання окулярів нічного бачення вночі екіпажами призводить до інформаційного перевантаження або дефіциту інформації, що в поєднанні з жорстким лімітом часу можуть стати причиною помилкових дій та призвести до зниження безпеки виконання польотів. При застосуванні окулярів нічного бачення (ОНБ), як однієї з систем відображення візуальної інформації, необхідно врахувати реальні можливості зорового аналізатора льотчиків, зокрема: кутового розміру сприйманого зображення, рівня адаптованої яскравості, контрасту між об'єктом спостереження і фоном, критичної частоти миготіння, часу інерції очей, затримки сприйняття, сліпучої яскравості, відносної видимості.

Актуальність дослідження. Досвід застосування вертольотів у пошуково-рятувальних та в інших операціях продемонстрував, що авіаційний компонент виконання завдань вертольотами відіграє важливу роль щодо досягнення цілей операцій, а в деяких випадках виконує головну роль у вирішенні поставлених завдань.

Особливості застосування вертольотів, дозволяють все більш широке їх використання для ведення спостереження в нічних умовах, але тим самим вводиться ряд обмежень щодо досягнення авіаційної безпеки польотів. Важливе значення для забезпечення ефективних дій у темний час доби має використання екіпажем ОНБ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання визначення головних особливостей та факторів щодо впливу ОНБ та адаптації світлотехнічного обладнання на безпеку польотів вертольотів є та залишається малодослідженим. Склад і характеристики ОНБ повинні відповідати психофізіологічним можливостям і обмеженням льотчика зі сприйняття, переробці, своєчасного й грамотного використання інформації для прийняття рішення.

Інформаційне перевантаження або дефіцит інформації в поєднанні з жорстким лімітом часу можуть стати причиною помилкових дій льотчика під час використання ОНБ. Характеристики зорового аналізатору відображені в табл. 1.

Докладні пояснення по кожній з характеристик можна знайти в роботах Шибанова Г. П. [1, 2], Маслова С. В. [3]. Усі ці характеристики в повному обсязі повинні бути враховані при проектуванні й випробуваннях як самих ОНБ, так і вертольотів, обладнаних ними.

Таким чином, незважаючи на необхідність використання ОНБ при виконанні польотів вертольотами вночі для підвищення ефективності роботи пілотів, слід зауважити, що ще недостатньо досліджено вплив використання ОНБ на безпеку польотів.

Виклад основного матеріалу

До недавнього часу через низьку освітленість виконання більшості завдань з виявлення та розпізнавання цілей в нічних умовах викликало необхідність штучного підсвічування цих цілей. Але в ряді випадків таке підсвічування погіршує видимість через вплив засвічування шару атмосфери або просто недопустиме. У всіх цих ситуаціях для оснащення екіпажів потрібна найсучасніша техніка нічного бачення.

Виконання завдань екіпажем вертольотів, обладнаного окулярами нічного бачення, незалежно від метеоумов, при зменшенні висоти польотів до гранично малої, значно підвищили вимоги щодо забезпечення авіаційної безпеки льотчиків інструментальними засобами відображення закабінного простору, якими і є ОНБ.

На сьогоднішній день, у зв'язку зі стрімким розвитком ОНБ, та вимог до якості їх функціонування основною задачею для забезпечення авіаційної безпеки польотів є якісне виконання адаптації світлотехнічного обладнання вертольотів, навчання екіпажів та дотримання усіх обмежень та застережень при виконанні завдань в темну пору доби як для існуючих, так і нових вертольотів різного призначення, до складу обладнання яких входять ОНБ другого й наступних поколінь.

Сучасні ОНБ, на відміну від телевізійного та тепловізійного зображень на плоскому екрані індикаторів, дають можливість сприйняття тривимірного закабінного простору, забезпечуючи основні психофізіологічні механізми зорового орієнтування.

Таблиця 1 – Характеристики зорового аналізатора льотчика

Назва характеристик зорового аналізатора	Формула для розрахунку кількісного значення характеристики	Параметри, від яких залежать характеристики зорового аналізатора
Кутовий розмір зображення	$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = h/2l$	h – лінійний розмір спостережуваного об'єкта; l – відстань від очей льотчика до спостережуваного об'єкта візування; β – кут між двома променями, направленими від очей льотчика до крайніх точок зображення
Рівень яскравості (Середня із сприйняття очима яскравості)	$L_{vcp} = \frac{1}{A} \int_A L_v(A) dA$	$L_v(A)$ – моментальне значення яскравості елементарної ділянки dA світіння поверхні приладної панелі при використанні окулярів ОНБ; A – сприйняття очима сумарної площі світіння поверхні приладної панелі при використанні окулярів ОНБ
Яскравість об'єкта спостереження (кд/м ²)	$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \theta}$	L_v – сила світла, визначаємо як відношення світлового потоку який розповсюджується від джерела в розповсюдженному напрямленому всередину малого тілесного кута, до цього тілесного кута; θ – кут між розповсюджуючим направленням до ділянки; dA – видної в ОНБ цілі або світіння поверхні приладної панелі
Критична частота миготіння	$f_{kp} = 9,61g(10^{-4} L_v) + 65$	f_{kp} – частота появи світлового сигналу, яку око в змозі розпізнати; при $L_v = 30; 110; 250; 350$ (кд/м ²) КЧМ рівна відповідно 40; 45; 47; 49 Гц
Час інерції очей	$L_{vk}(t) = L_{v0} e^{-t/\tau}$	L_{v0} – яскравість в момент призупинення дії подразника; τ – постійна часу інерції ока
Сліпуча яскравість	$L_{vc} = L_{va} + \frac{840}{\sqrt[3]{\beta}} \times \sqrt[3]{L_{va}}$	L_{vc} , L_{va} – сліпуча та адаптуюча яскравість відповідно; β – тілесний кут, під яким льотчику видно освітлення поверхні (в стерadianах).
Перцептивна затримка очей	$t_{n3} = \frac{[d - (1 - \alpha)/n] \left[1 - \left(1 - \frac{\alpha \rho}{n} \right) \right]}{(d + 1) \alpha^2 \rho}$	α – 10 Гц, $\rho = 0,01$ с (частотні характеристики електроенцефалограми); d – число рівно ймовірних альтернативних сигналів, які поступають зовні в оперативну пам'ять льотчика; n – число нейтральних еталонів спостережуваних об'єктів в порівнянні зі знов сигналами, що надходять
Затримки сприйняття світових сигналів	$t_s = t_{n3} \left\{ 1 + \left[\frac{1}{1 + K \lg(E_v/E_{vn} + 1)} \right] \right\}$	E_v – освітленість сприйняття об'єкта; E_{vn} – порогове значення освітленості, яке забезпечує правильне сприйняття зображення об'єкта спостереження; K – коефіцієнт, значення якого експериментально встановлено рівним 0,85
Відносна видимість (енергетична характеристика зорового аналізатора)	$K_\lambda = \frac{R_\lambda}{R}$	R – зорове відчуття, яке викликається джерелом випромінювання довжиною хвилі 550 нм; R_λ – зорове відчуття, яке викликається джерелом тієї ж потужності, але генеруємим випромінюванням, довжина хвилі якої дорівнює λ
Яскравість, як функція відносної видимості	$L_v \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_\lambda(\lambda) d\lambda$	$\lambda_1 \dots \lambda_2$ – вибіркового діапазону випромінювання, характерний для кабіни конкретного ЛА

При цьому зберігається головний фактор глибинного зору – бінокулярний паралакс, коли людина бачить об'єкти через ОНБ кожним оком, як в природних умовах. Крім того, на відміну від плоского зображення, бінокулярні ОНБ дозволяють надійно оцінювати просторове положення вертольоту по відношенню до земної поверхні і зовнішніх об'єктів (орієнтирів, цілей), а також динаміку їхніх переміщень.

Застосовуючи ОНБ, екіпаж може спостерігати за навколишнім простором у полі зору окулярів тільки у відповідному секторі. Тому в залежності від умов польоту (висота, швидкість, метеорологічна дальність видимості, вологість повітря й прозорість атмосфери, природна нічна освітленість, рельєф місцевості, характер підстильної поверхні тощо) змінюється характер розподілу уваги екіпажу між візуальним і приладним пілотуванням. Показання приладів екіпаж зчитує з циферблатів або моніторів, переводячи погляд повз окуляри нічного бачення. Масштаб зображення закабінного простору становить приблизно 1:1 [4], проте відзначено наявність

помилки льотним складом (особливо малодосвідченого або який має перерви в польотах) в окомірних визначеннях геометричної висоти і дальності до об'єктів. Величина помилки може досягати до 10% від істинного значення. Працездатність сучасних ОНБ по відображенню закабінного простору зберігається до рівнів природної нічної освітленості від 1 лк до 5×10^{-3} лк в діапазоні спектра при певній довжині хвиль.

Пілотування вертольоту із застосуванням ОНБ має ряд особливостей (рис. 1), виходячи з такого:

зменшення розмірів полів зору в порівнянні з денними умовами, що призводить до створення “тунельного ефекту” уявлення закабінного простору;

виражена залежність якості електронного зображення закабінного простору від рівня природної нічної освітленості та інших зовнішніх умов;

обмеження дальності видимості закабінного простору. Низька роздільна здатність електронно-оптичних перетворювачів з передачі малорозмірних об'єктів і їх деталей;

низька завадо захищеність від світлових джерел, що потрапляють в поле зору ОНБ;

необхідність зчитування приладової інформації повз ОНБ, що вимагає від екіпажа відволікання уваги від спостереження за зовнішнім простором;

можливість виникнення у льотчика ілюзорних відчуттів, особливо в умовах обмеженої видимості,

відсутності видимості лінії природного горизонту, раптовою появою світлових перешкод, часткову або повну відмову ОНБ тощо;

виникнення відчуття втоми шийних м'язів, органів зору, наявність загального стомлення, що супроводжуються вираженим зростанням нервово-емоційної напруги, до кінця польоту тривалістю 3 години і більше в одну льотну зміну;

необхідність особливих методів психологічної підготовки льотчиків, пов'язаних зі зміною звичних для льотчика умов сприйняття закабінної і внутрікабінної інформації, зростанням (до граничних значень) психофізіологічного навантаження уваги й необхідності формування нової послідовності дій і перерозподілу функцій в екіпажі.

Підготовка льотчиків до виконання польотів з ОНБ проводиться на реальних вертольотах і в реальних умовах, що нерідко призводить до виникнення у екіпажа психологічної напруги і стресу.

Досвід проведення науково-дослідних робіт наземних і льотних випробувань на базах підприємств, аеродромах свідчить про позитивний ефект застосування ОНБ, що, в цілому, дозволяє обґрунтувати доцільність їх використання екіпажами сучасних вертольотів для вирішення специфічних завдань вночі. Розширюючи коло завдань, які вирішуються у нічному польоті, використання ОНБ вимагають досить суворої регламентації їх застосування, щоб уникнути передумов до виникнення особливих ситуацій та відповідного зниження безпеки польотів. Так, відповідно наказу Міністерства оборони України №2 від 05.01.2015 "Про затвердження правил виконання польотів державної авіації України" та за результатами випробувань [5–7], максимальний наліт екіпажа із застосуванням ОНБ в льотну зміну не повинен перевищувати 3 год, в одному польоті 2 год (на гранично малій висоті 1 год).

Після досягнення визначеного максимального нальоту чи закінчення стартового часу подальший політ екіпажу вертольоту дозволяється виконувати після відпочинку (сну) не менше 8 год.

Надмірне використання ОНБ, як правило, призводить до значних навантажень на органи зору екі-



Рис. 1. Особливості пілотування вертольоту з ОНБ

пажа, а згодом до скарг на больові відчуття і, як результат, може призвести до авіаційних інцидентів та подій.

Результати досліджень підтвердили, з одного боку, фізіологічну еквівалентність бінокулярних ОНБ, а з іншого інформативну нееквівалентність природної і приладової візуалізації закабінного простору при застосуванні ОНБ. Ця обставина не дозволяє класифікувати умови польоту в ОНБ, як політ за правилами візуальних польотів. При цьому основною перешкодою є не порушення відповідності між реальним простором і його зображенням, а нестабільність цієї невідповідності.

Якщо умовно ввести коефіцієнт адекватності (інформативності) відображення закабінного простору, то його величина в залежності від різних умов буде змінюватися від допустимих до неприйнятних значень. Тобто безпосередньо впливати на зміну необхідного рівня безпеки польотів із застосуванням ОНБ.

Виникнення ілюзій може сприяти до дезорієнтації льотчика, що може призводити до непередбачених, катастрофічних наслідків польоту. Особливо небезпечно виникнення ілюзій поблизу землі, на етапах зльоту, посадки, висіння, польоту на гранично-малій висоті (нижче ніж 50 м). Аналіз ілюзій просторового положення і руху, що зустрічалися у льотчиків в польотах з ОНБ,

засвідчив, що вони можуть зустрічатися на всіх режимах і етапах польоту. Ілюзії зберігаються, як правило, від кількох до десятків (30 с. та більше).

Основними причинами появи ілюзій (рис. 2) були:

напруженість, що виникала у льотчиків при освоєнні нового виду польотів;

різка зміна зовнішніх умов (зниження освітленості, поява опадів, світлових перешкод тощо);

втрата орієнтиру на режимі висіння над майданчиками з одноманітним рельєфом;

наявність високої трави, що відхиляється потоком, що йде від несучого гвинта і створює ілюзію переміщення вертольоту;

затримка уваги (погляду) на одному об'єкті, ділянці протягом тривалого часу.

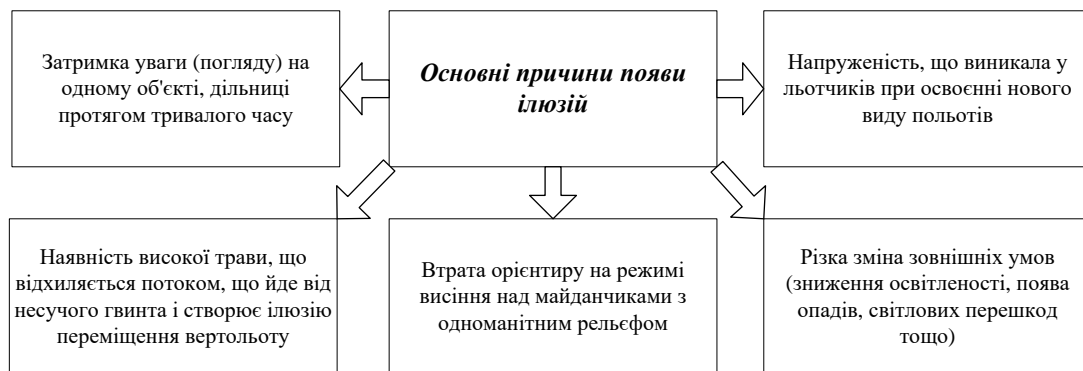


Рис. 2. Основні причини появи ілюзій

Для попередження появи ілюзій, а також їх парировання необхідно постійно переміщати погляд по склінню кабіни і простору підстильної поверхні, пілотувати більш плавно, ніж у денних умовах, а також не допускати різких рухів, поворотів голови і тіла. Крім того, при виникненні ілюзії важливо не втратити самовладання, перевести погляд на лінію горизонту, при її відсутності – на електромеханічні прилади. При збереженні ілюзії перейти на пілотування за приладами і набрати безпечні висоту і швидкості польоту. Безпека польоту, ефективність і якість взаємодії в системі “льотчик – вертоліт – ОНБ” забезпечуються:

достатнім професійним рівнем підготовки екіпажу;

необхідними характеристиками ОНБ (полями зору, чутливістю електронно-оптичних перетворювачів, завадо захищеністю від джерел світла);

прийнятними умовами польоту (рівнем природної нічної освітленості, висотою і швидкістю

польоту, характером і рельєфом підстилаючої поверхні, наявністю природних і штучних перешкод, метеорологічних умов тощо).

Головні висновки та перспективи використання результатів досліджень

Виконання завдань вертольотами вночі значно знижує можливості льотчика з повноцінного використання як закабінної, так і внутрікабінної інформації, ускладнює ведення орієнтування на місцевості.

Для успішного виконання завдань екіпажем вертольоту основне значення набувають інструментальні засоби відображення закабінного простору, системи автоматизації процесів пілотування, навігації та бойового застосування.

Розробка методу адаптації світлотехнічного обладнання вертольоту при використанні ОНБ в темну пору доби дозволить значно покращити рівень безпеки польотів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шибанов Г.П. Загальні вимоги до безпеки польотів. Т. IV / РАН, NASA США. М.: Наука, 2001. С. 377-401.
2. Шибанов Г.П. Роль ергономічних факторів в системі «спеціаліст - среда - авіатехніка» і критерії її ергономічної оцінки. Сб. «Техніка, економіка, інформація». Сер. «Ергономіка», п/я А-1420. Вып. 3с, 1982. С. 18-19.
3. Маслов С.В. Особенности обеспечения безопасности полётов вертолётчиков при использовании лётным составом очков ночного видения. / С.В. Маслов А.А. Есев, В.Е. Овчаров, А.В. Чунтул / Проблемы безопасности полётов - № 7, 2010. - С. 30 - 36.
4. Грузевич Ю.К. Оптико-електронні прилади нічного бачення / Ю.К. Грузевич / 2014. - С. 212-259.
5. Наказ Міністерства оборони України №2 від 05.01.2015 "Про затвердження правил виконання польотів державної авіації України".
6. Franck D.L., Geiselman e.e., Craig J.L. Panoramic Night Vision Goggle Flight Test Results. Proceedings of SPIE, 2000. – С. 146–154.
7. Goodman G.W. Future Night Vision. Armed Forces Journal International, 2001.– С. 22, 24.

Received (Надійшла) 10.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2023

Analysis of features affecting the safety of helicopter flights when using night vision goggles at night

V. Kolomiets

Abstract. The article discusses the main factors and features that affect the level of flight safety when using night vision goggles at night. The importance of technical parameters of night vision goggles to ensure effective actions in the dark time of day when used by pilots. In connection with the rapid development of night vision goggles and the requirements for the quality of their functioning, the main task for ensuring the aviation safety of flights is the high-quality implementation of the adaptation of the lighting equipment of helicopters, the training of crews and the observance of all restrictions and precautions when performing tasks in the dark, as for existing, as well as new helicopters of various purposes, the equipment of which includes night vision goggles of the second and subsequent generations.

Keywords: adaptation of lighting equipment, night vision goggles, flight safety, in-cabin information, behind-the-cabin information.

Ю. М. Толкунова

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

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПОДОЛАННЯ ПЕРЕШКОД ДЛЯ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Анотація. Більшість відповідальних завдань виконуються безпілотними літальними апаратами (БПЛА) під контролем оператора. Однак взаємодія робота та оператора в сучасних умовах вже не є управлінням в традиційному вигляді. Сучасні БПЛА оснащені системами технічного зору, базами даних та знань, на основі яких літальний апарат може самостійно приймати рішення. База знань робота дозволяє йому самостійно орієнтуватися в навколишньому середовищі та приймати рішення щодо виконання поставленого завдання. Функції людини-оператора тепер складаються з постановки завдань роботу проблемно-орієнтованою мовою, близькою до природньої, та спостереження за діями робота. Візуальне планування являє собою розширення методів планування та обходу перешкод для завдань, у яких джерелом інформації про довкілля є системи технічного зору на базі відеокамери чи скануючих систем. В статті зроблено огляд методів візуального планування. Велика кількість існуючих методів і алгоритмів обробки зображень та можливі їх комбінації дозволяють розв'язувати найрізноманітніші задачі, постійно вдосконалювати існуючі алгоритми та за рахунок цього підвищувати ефективність обробки зображень. Але який би метод не було застосовано для візуального планування існують проблеми отримання якісної вхідної інформації пов'язані з метеорологічними умовами, обумовленими опадами і туманом, та відблисками, якщо зображення отримується за допомогою відеокамери. Це можуть бути сонячні відблиски або відблиски, що надходять від інших джерел освітлення. В статті запропоновано методика виявлення та виключення відблисків з зображення. Оскільки основна інформація про навколишнє середовище, яку аналізує робот, залежить від якості зображення, необхідні відповідні методи, які враховують атмосферні опади. В статті проведено аналіз методів виключення різноманітних видів опадів з зображення та зроблено висновки про стан їх розробки.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, подолання перешкод, візуальне планування, виявлення відблисків, атмосферні опади, обробка зображень.

Вступ

Розробка сучасних БПЛА підвищує вимоги до систем автоматичного управління літальними апаратами та навігаційного забезпечення польоту. Застосування БПЛА для військових цілей та виконання операцій в надзвичайних ситуаціях зазвичай охоплює значні території та потребує вдосконалення системи контролю та керування БПЛА, потребує досконалих алгоритмів подолання перешкод при автоматичному управлінні БПЛА. Для отримання інформації про навколишнє середовище БПЛА використовує датчики, в тому числі відеокамери. Системи подолання перешкод, які працюють на основі даних, отриманих з відеокамер, повинні працювати в різних погодних умовах та умовах освітлення. Орієнтація та подолання перешкод повинні виконуватися в метеорологічних умовах, обумовлених опадами і туманом, та в різних умовах освітлення. Тому метою даної роботи є аналіз існуючих методів візуального планування, виключення відблисків та різноманітних видів опадів з зображення та розробка методики виключення відблисків з зображення для досконалої роботи системи подолання перешкод БПЛА.

1 Візуальне планування

Візуальне планування являє собою розширення методів планування та обходу перешкод для завдань, у яких джерелом інформації про довкілля є системи технічного зору на базі відеокамери чи скануючих систем. Більшість робіт із цієї галузі присвячено вивченню таких питань, як оптимальний вибір міток для локалізації робота [1], визначення міс-

цезнаходження за наявними візуальними орієнтирами [2], відстеження візуальних орієнтирів і уточнення положення [3]. Пропонуються роботи, в яких для відділення перешкод від фону використовується контрольна область безпосередньо перед роботом, яка порівнюється з частиною зображення, що залишається [4].

В роботі [5] запропоновано використовувати три незалежні модулі виявлення перешкод, які використовують критерій градієнта яскравості, RGB-кольору та HSV-кольору. Результат об'єднується для отримання границі положення перешкод та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Підхід, що описано потребує наявності кольорового зображення на вході системи, а також чіткого виявлення контурів перешкод.

У статті [6] представлені деякі експерименти навігаційної системи в реальному часі, що керується двома камерами, спрямованими збоку від напрямку навігації (Divergent Stereo). Запропонований підхід припускає, що для цілей навігації не використовується інформація про відстань, а використовується якісна інформація про оптичний потік, обчислена для областей поля зору двох камер.

Згідно з цією ідеєю, мобільний транспортний засіб було оснащено парою камер, які дивляться збоку, і реалізовано контролер на основі швидкого обчислення оптичного потоку в реальному часі. Управління мобільним роботом базується на порівнянні видимої швидкості зображення лівої та правої камер. Застосування такого рішення ґрунтується на дослідженнях, що описують поведінку вільно літаючих медоносних бджіл і механізми, які вони використовують для сприйняття дальності.

Наприкінці минулого сторіччя запропоновано алгоритм на основі обчислення просторових та часових похідних отриманих зображень та формування на їх основі команд керування [7]. Недоліком такого підходу є наявність сліпої плями у центрі зображення, викликаній нульовою похідною нерухомих перешкод, що перебувають у лінії руху об'єкта. Крім того, для коректної роботи алгоритмів на основі оптичних потоків у реальних умовах необхідно здійснювати механічну компенсацію вібрацій камер.

У роботі [8] вирішується завдання найкращого вибору такого стану робота, при якому можливо скласти найбільш адекватну картину зовнішнього середовища.

Методи, пов'язані з використанням цифрової обробки зображень для візуального визначення та позбавлення зображення від спотворень набули значного розвитку в останні роки. У статті [9] розглядається проблема моделювання роботи оптико-електронної системи БПЛА для завдання налагодження алгоритмів пошуку та ідентифікації навігаційних орієнтирів. Пропонується використовувати віртуальний полігон, що формується на основі даних, взятих із відкритих джерел (Google Earth, Shuttle radar topographic mission) для моделювання відеопотоку даних, що одержуються з камери БПЛА. При розробці використано бібліотеку OpenGL, що значно спростило вирішення задач візуалізації сцен, а також процес моделювання погодних умов та умов освітлення.

В статті [10] розглянуто методи цифрової обробки відеозображень апаратурою безпілотного літального апарата. Здійснено огляд, систематизацію та аналіз існуючих методів і алгоритмів цифрової обробки зображень, досліджено практичні та теоретичні проблеми їх використання.

Ряд робіт присвячено візуальному плануванню на основі нечіткої логіки. В роботі [11] розроблено нечіткий планувальник для побудови маршруту мобільного робота. Робота нечіткого планувальника є циклічною та включає послідовність наступних дій: виявлення перешкод відповідно секторами поділу навколишнього простору; вибір поведінки мобільного робота; здійснення керуючих параметрів руху мобільного робота (напрямок, швидкість) на основі обраної поведінки.

В статті [12] розроблено гібридну моделі візуального планування з використанням нейронної мережі та нечіткого регулятора. Автор статті за допомогою нейронної мережі отримав функції належності та базу правил для нечіткого регулятора, який в свою чергу і керував процесом руху. Перевагою цього підходу є те, що формується мінімальна кількість функцій належності та правил, тож швидкість виконання алгоритму нечіткої логіки на контролері збільшується.

В статті [13] виконано порівняння нечіткого алгоритму, нейро-нечіткого алгоритму, гібридного алгоритму нечіткої логіки і генетичного алгоритму та гібридного методу роя частинок і нечіткого алгоритму. Результати показали, що нечіткий алгоритм

краще за всіх інших з точки зору мінімізації енергії повороту. Гібридний алгоритм нечіткої логіки показав найкращі результати для часу наближення до цілі.

Гібридний метод роя частинок і нечіткого алгоритму та нейро-нечіткий алгоритм виявились приблизно однаковими за характеристиками. В результаті усіх експериментів автори зробили висновок, що нечіткий регулятор виявить себе найкращим чином в реальних умовах.

При роботі в реальних умовах треба враховувати наявність несприятливих погодних умов (дощ, сніг, туман) та умов освітлення, в тому числі, наявність сонячних відблисків.

Щодо навігації БПЛА при несприятливих погодних умовах на сьогоднішній день запропоновано алгоритми обробки зображень, які мають певні переваги та недоліки [14, 15, 25].

Але недостатньо розроблені методи боротьби з сонячними відблисками або відблисками, що надходять від іншого джерела освітлення. Зважаючи на це, в статті запропоновано методіку виключення відблисків з зображення.

2 Виявлення відблисків на зображеннях

В роботі системи подолання перешкод може виникнути ситуація коли на зображенні, що аналізує система будуть наявні відблиски або відображення світла, що надходить від джерела освітлення. Оскільки інформація про наявність перешкоди, яку аналізує програма, залежить від якості зображення, відблиски на зображенні, необхідно виключити з обробки.

Відеокамера, за допомогою якої формується зображення, зчитує зображення в колірній моделі RGB, яке потім оцифровується в форматі 24 біти на піксель і надходить у комп'ютер. Пікселі, що відповідають відблиску, мають значення інтенсивності, близьке до 250.

Практично на досліджуваних зображеннях відблиск можна виявляти за значенням однієї з компонентів RGB більше 200. На рисунку 1 зображено профіль рядка синьої компоненти зображення, що містить відблиск.

Частина графіка профілю рядка зображення, яка відповідає області відблиску, показана на рисунку 1 та має пік значення зображення, що становить 212 одиниць.

3 Методика виключення відблисків з зображення

Методика виключення відблисків з зображення виглядає так:

Крок 1. Визначити середнє значення інтенсивності на зображенні та задати його як порогове.

Крок 2. Визначити координати хоча б одного пікселя для відблиску на зображенні. Якщо відблисків декілька, то визначити координати хоча б одного пікселя для кожного відблиску на зображенні. Це можна зробити, порівнявши значення інтенсивності компонентів зображення з пороговим значенням. Усі знайдені точки занести до списку.

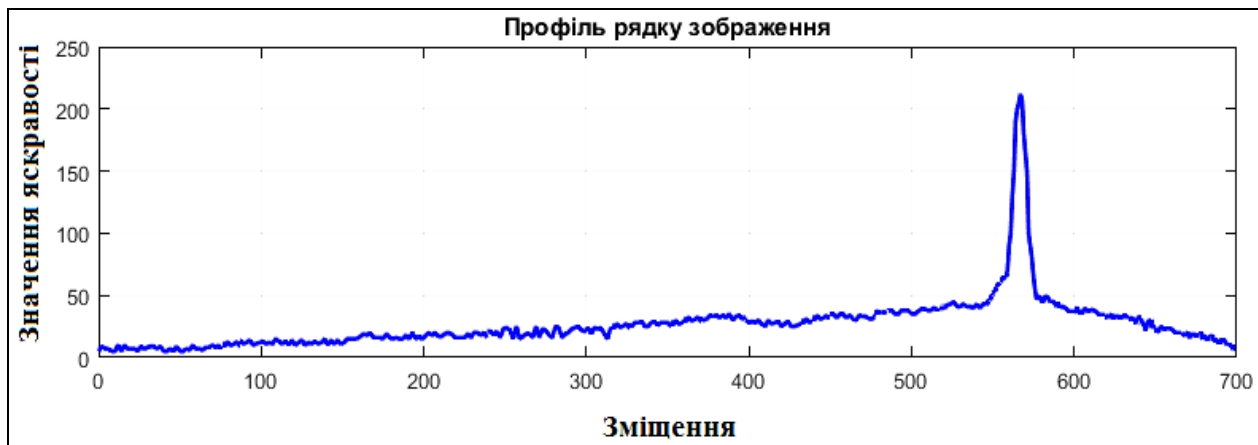


Рис. 1. Профіль рядку синьої компоненти зображення, яке містить відблиск

Крок 3. Для кожної точки, знайденої на попередньому кроці, визначити межі відблиску, до якого вона відноситься. Цього можна досягти, якщо з кожної точки рухатися в радіальних напрямках і стежити за тим, як змінюється модуль похідної яскравості зображення у напрямку руху. Точка, в якій модуль похідної почне зменшуватися, і є межею відблиску. На графіку, зображеному на рисунку 1 видно, що ця умова виконується для точок з координатами 547 та 576.

Крок 4. Пошук границь відблисків:

- формування початкового набору «активних» точок, що належать відблиску (див. опис кроку 1). Для кожної точки зберігається обчислена останній раз різниця в інтенсивності сусідніх точок послідовності (спочатку ця різниця має нульове значення);

- на основі початкового набору визначається набір «активних» точок наступного покоління. Ними обираються точки, сусідні для точок попереднього покоління, які задовольняють критерію:

$$(p_i - p_{i-1}) \geq (p_{i-1} - p_{i-2}),$$

де p_i – інтенсивність i -ї точки в послідовності;

- процес набору «активних» точок зупиняється, коли набір точок наступного покоління на відповідній операції буде пустим. Усі пікселі, які належать будь-якому з попередніх поколінь точок, відносяться до відблисків. Кордон області відблиску відповідає моменту різкої зміни нахилу дотичної до графіку у бік зменшення модуля похідної.

Інформація про яскравість пікселів, що використовується для пошуку меж відблисків, формується в результаті фільтрації початкового RGB зображення (для усунення високочастотних шумів) та подальшого переведення зображення в колірну модель YCrCb [16]. У цьому просторі компонент Y включає тільки інформацію про яскравість пікселів, а компоненти Cb і Cr містять лише інформацію про колір та насиченість. Такий простір дозволяє передати компонент яскравості з більшою роздільною здатністю, ніж компоненти кольоровості.

Визначення компонентного сигналу задається через сигнали основних кольорів R, G, B із рівнянь:

$$Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B.$$

$$(R - Y) = R - 0,299R - 0,587G - 0,114B = 0,701R - 0,587G - 0,114B.$$

$$(B - Y) = B - 0,299R - 0,587G - 0,114B = -0,299R - 0,587G + 0,886B.$$

Тут R, G, B – вихідні сигнали основних кольорів, скореговані з метою забезпечення оптимальної якості зображення.

На сьогоднішній день колірна модель YCrCb є досить поширеним кольоровим простором. В цій колірній моделі колірний відтінок відокремлений від яскравості, що є важливим в умовах недостатньо рівномірного освітлення об'єкту дослідження.

Якщо значення сигналів в колірному просторі YCrCb привести до одиниці, то отримаємо значення для білого, чорного та насичених основних та додаткових кольорів.

Значення сигналу Y знаходяться в межах від 0 до 1, значення сигналів для Cr змінюються від $-0,701$ до $0,701$ та від $-0,886$ до $0,886$ для Cb. Приведення діапазонів зміни сигналів Cr та Cb до одиниці досягається введенням нормуючих коефіцієнтів $K_r = 0,5/0,701 = 0,713$, $K_b = 0,5/0,886 = 0,564$.

Сигнал яскравості і нормовані кольорові сигнали пов'язані з сигналами основних кольорів наступним матричним перетворенням:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,5 & -0,41869 & 0,08131 \\ -0,168874 & 0,33126 & 0,5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

4 Аналіз методів виключення атмосферних опадів з зображення

Джерелом зовнішнього шуму може бути середовище між об'єктом і пристроєм, що реєструє, наприклад, пил або опади в атмосфері.

Шуми можуть бути викликані зовнішніми випадковими процесами і спостерігатися як Гаусов шум, так і імпульсний шум, або їх комбінація.

Для пригнічення біполярних імпульсних шумів використовується медіанний фільтр Тьюкі [17] з використанням ковзного вікна. Але він має певні недоліки, які полягають в тому, що замінюється, у загальному випадку, більшість точок зображення.

Дана особливість алгоритму пов'язана з ковзним вікном фільтру, яке задає інтенсивність точки з координатами, відповідними координатам його центральної точки, при цьому береться медіанне значення інтенсивності для всього вікна (рис. 2).

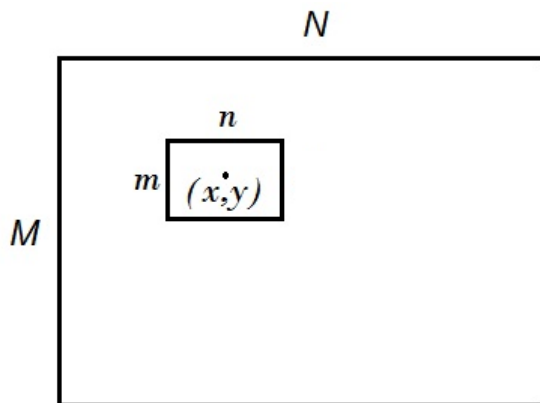


Рис. 2. Зображення $M \times N$ та ковзне вікно $m \times n$

Тобто, якщо рахувати інтенсивності на зображенні випадково розподіленими величинами, а розмір вікна рівним $m \times n$ дискретних відліків, то ймовірність того, що інтенсивність точки на зображенні залишиться незмінною, буде обернено пропорційна площі вікна $m \times n$.

Таким чином, у загальному випадку, навіть для невеликого вікна 3×3 більша частина інтенсивностей на зображенні буде змінена та їх частка зростає зі збільшенням вікна.

В роботі [14] запропоновано адаптивний медіанний фільтр Гонсалеса, в якому введено додаткове припущення про характер шуму, а саме – що відповідно до моделі біполярного шуму, інтенсивності імпульсів, які необхідно пригнічити, можуть дорівнювати тільки максимально і мінімально можливим значенням, і використовувати це припущення для того, щоб застосовувати фільтр тільки для точок, що відповідають даному критерію.

Запропонований біполярний імпульсний шум є спрощеною моделлю, у зв'язку з чим адаптивний фільтр Гонсалеса часто буває непридатним для реальних зображень. Значення інтенсивностей імпульсів на зображенні можуть приймати більше двох значень, відмінних від мінімального і максимально можливих у кольоровому просторі, що розглядається.

У статті [18] проведено всебічний аналіз візуальних ефектів дощу та різні фактори, що впливають на нього. На основі цього аналізу проведено моделювання дощу та застосування отриманої моделі в комп'ютерному зорі. Розроблено фотометричну модель, що описує інтенсивність окремих смуг дощу, та динамічну модель, що фіксує просторово-часові властивості дощу.

Водночас ці моделі описують повний візуальний вигляд дощу. З використанням цих моделей розроблено алгоритм постобробки для виявлення та видалення дощу.

Проаналізовано унікальні фізичні властивості дощу – його невеликий розмір, висока швидкість та просторовий розподіл. Видимість дощу сильно залежить від параметрів камери. Ця залежність використовується для зменшення видимості дощу під час отримання зображення шляхом розумного вибору параметрів камери.

Тим не менш, запропоновані моделі потребують доповнення для врахування інших опадів, наприклад, снігу та туману.

В роботі [19] пропонується перетворити біполярну модель імпульсного шуму в модель мультиполярного імпульсного шуму. Його суть полягає в тому, що шум може мати декілька основних значень (поліосів) із розкидом значень інтенсивностей щодо поліосів. Пропонується обробляти цей шум у три етапи.

Перший етап. Аналіз зображення об'єкта, що вимагає обробки – зображення з накладеним мультиполярним імпульсним шумом. Визначення поліосів інтенсивностей на гістограмі (для випадку монохроматичного зображення). Ці поліоси будуть змішані з вихідним зображенням, тому їхнє визначення може бути ускладнене – поліоси можуть "тонуть" в іншому сигналі, або мати помилкові піки. Для отримання більш чистих даних здійснюється реєстрація серії зображень без об'єктів за тих же умов, що і зображення, що обробляється.

Таким чином, виходить серія зображень, на яких присутній тільки імпульсний шум, чи серія зображень, за якими можна статистично виявити поліоси шуму.

Другий етап. Розглядається ситуація, коли на фоні шуму є об'єкт. Формується така ж гістограма шуму, як на вихідному зображенні, але, інша реалізація шуму, ніж на зображенні без об'єкта. Для зображення інтенсивності імпульсів розташовуються біля набору поліосів $z_1 = 239$, $z_2 = 119$ і $z_3 = 48$. При цьому, присутній розкид значень (який можна вважати нормальним розподілом відхилення від поліоса).

У реальних системах реєстрації зображень такий розкид можна пояснити наявністю адитивного шуму в системі, а також усуненням центру імпульсу щодо пікселя. Наочно проілюструвати такий розподіл можна як гістограми щільності ймовірності значень інтенсивностей z імпульсного шуму. На основі одержаного розподілу налаштовується модель мультиполярного імпульсного шуму. Ця модель використовується для формування умови застосування медіанного фільтру для кожного конкретного пікселя зображення.

Третій етап. Виконується видалення мультиполярного імпульсного шуму на зображенні, за допомогою медіанного фільтру з застосуванням умови спрацьовування: заміщення на медіанне значення Z_{med} ковзного вікна її центральної точки проводиться тільки коли її інтенсивність відповідає ймовірним значенням обраної моделі мультиполярного імпульсного шуму:

$$z(x, y) = z_i \pm \delta z_i, i = 1, \dots, n,$$

де δz_i – обране допустиме середньоквадратичне відхилення відповідно до моделі (тобто, величина, що відповідає обраному діапазону значень імпульсу навколо полюса z_i).

Модель мультиполярного імпульсного шуму дозволяє більш детально моделювати процес формування зображень в умовах зашумлення. Тим не менш в роботі не наведено практичних результатів для реальних зображень.

В статті [20] запропоновано алгоритм видалення дощу, який включає як часові, так і хроматичні властивості дощу на відео. Дощ можна розглядати як сукупність сферичних крапель, які випадково розподілені та рухаються з високою швидкістю. Коли краплі дощу знаходяться дуже далеко від камери, їх візуальний ефект дуже слабкий і вони виглядають як туман [21].

Тому розглядаються лише краплі дощу, які знаходяться близько до камери.

Сферична крапля дощу має широкий спектр заломлення світла [22]. Отже, проекція краплі дощу на зображення набагато яскравіше, ніж фон. Проведене дослідження показує, що збільшення інтенсивностей R, G, B кольорів залежить від фонові сцени. Через різницю в довжині хвилі синє світло має більший індекс заломлення та ширше поле зору, ніж червоне світло.

Тому крапля дощу повинна сильніше заломлювати синій колір світла, що надходить із фону.

Використовуючи обидві властивості в роботі [20] розроблено алгоритм видалення дощу, який може виявляти та видаляти смуги дощу в стаціонарних і динамічних сценах. За допомогою запропонованого алгоритму може бути видалений як легкий, так і сильний дощ, як дощ у фокусі та дощ поза фокусом.

Експериментальні результати показують, що алгоритм працює краще, ніж існуючий методи.

У статті [23] представлено імовірнісний метод, який використовує статистичні дані як альbedo, так і глибини сцени, щоб видалити з зображення шуми, викликані зваженими частинками, такими як туман і імла, що значно погіршують якість зображення. Ключова ідея полягає в тому, щоб змоделювати зображення за допомогою марковського випадкового поля, в якому альbedo та глибина сцени є двома статистично незалежними шарами.

Показано, що можна використати статистичні дані зображення та глибини на цих прихованих шарах і розкласти туманне зображення на множники. Експериментальні результати показують, що запропонований метод забезпечує більш точне відновлен-

ня порівняно з сучасними методами, які зосереджені лише на індивідуальному відновленні альbedo або глибини сцени.

В роботі [24] розроблено модель форми та виявлення окремих смуг дощу в просторі зображення. Виявлення окремих смуг ускладнене навіть за наявності точної моделі зовнішнього вигляду, тому поєднано модель смуг із статистичними характеристиками дощу, щоб створити модель загального ефекту динамічної погоди в частотному просторі. Потім модель адаптується до відео та використовується для виявлення смуг дощу спочатку в частотному просторі, а потім результат виявлення переноситься в простір зображення.

Також розроблено модель для виявлення смуг снігу. Після виявлення, кількість дощу або снігу можна зменшити або збільшити. Демонструється, що частотний аналіз забезпечує більшу точність у видаленні динамічної погоди та продуктивності вилучення ознак, ніж попередні методи на основі пікселів.

Також показано, що на відміну від попередніх методів, такий підхід ефективний для відео з рухами сцени та камери.

Ця модель підходить, коли смуги дощу помітні, але розроблена модель не дозволяє виявити смугу дощу, коли вона недостатньо чітка.

З проведеного аналізу можна зробити висновок, що на сьогоднішній день алгоритми та методи виключення атмосферних опадів з зображення, які б враховували різноманітні опади, не достатньо розроблені та потребують подальших досліджень.

Висновки

В статті проаналізовано методи візуального планування, тобто методи які являють собою розширення методів планування та обходу перешкод для завдань, у яких джерелом інформації про довкілля є системи технічного зору.

При роботі в реальних умовах треба враховувати наявність атмосферних опадів та наявність сонячних відблисків або відблисків, що надходять від інших джерел освітлення.

Щодо боротьби з відблисками в статті розроблено методіку виявлення та виключення відблисків з зображення.

Проаналізовано методи виключення з зображення зашумлень у вигляді наявності несприятливих погодних умов (дощ, сніг, туман). Зроблено висновок, що методи виявлення та видалення різноманітних видів опадів в системах технічного зору потребують подальших досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Burschka D., Geiman J., Hager G. Optimal landmark configuration for vision-based control of mobile robots [Text] // Proc. of 2003 IEEE ICRA, Taipei, Taiwan, Sept. 14–19, 2003. P. 3917–3922.
2. Hayet J.B., Lerasle F., Devy M. Visual Landmarks Detection and Recognition for Mobile Robot Navigation [Text] // Proc. of 2003 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2003). Madison, Wisconsin, USA, 2003. V. II. P. 313–318.
3. Jurie F., Dhome M. Hyperplane Approximation for Template Matching [Text] // IEEE. Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. V. 24, №7. P. 996–1000.
4. Lourakis M. I.A., Orphanoudakis S. C. Visual Detection of Obstacles Assuming a Locally Planar Ground. [Text] // Technical Report FORTH-ICS, TR-207. 1997.

5. Lorigo L. M., Brooks R.A., Grimson W. E. L. Visually-Guided Obstacle Avoidance in Unstructured Environments [Text] // Proc. of IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1997. P. 373–379.
6. Santos-Victor J., Sandini G., Curotto F., Garibaldi S. Divergent stereo in autonomous navigation: from bees to robots [Text] // Intern. J. of Computer Vision. 1995. P. 159–177.
7. Coombs D., Herman M., Hong T., Nashman M. Real-time Obstacle Avoidance Using Central Flow Divergence and Peripheral Flow [Text] // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1995. P. 276–283.
8. Klein K., Sequeira V. View planning for the 3D modelling of Real World Scenes [Text] // 2000 IEEE/RSJ IROS. 2000. V. II. P. 943–948.
9. Ганченко В.В., Дудкин А.А., Инютин А.В., Поденок Л.П. Моделирование оптико-электронной системы беспилотных летательных аппаратов [Текст] // «Штучний інтелект» № 3. – 2010. – С. 453-461.
10. Проценко М.М. Аналіз методів цифрової обробки відеозображень апаратурою безпілотного літального апарата [Текст] // Вісник ЖДТУ № 3(62). – 2012. – С. 67-72.
11. Толкунова Ю.М. Розробка системи подолання перешкод для безпілотного літального апарату [Текст] // Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Control, Navigation and Communication Systems № 2, – 2022. – С. 32-36.
12. Hossen, J. A. Modified Hybrid Fuzzy Controller for Real-Time Mobile Robot Navigation [Text] / J. Hossen, S. Sayeed, A.K.M. Parvez Iqbal // Procedia Computer Science. – 2015. – V.76. – P. 449-454.
13. Algabri, M. Comparative study of soft computing techniques for mobile robot navigation in an unknown environment [Text] / M. Algabri, H. Mathkour, H. Ramdane, M. Alsulaiman // Computers in Human Behavior. – 2015. – V.50. – P. 42-56.
14. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
15. Jia Z., Wang H., Caballero R.E. et al. A two-step approach to see-through bad weather for surveillance video quality enhancement [Text] // Machine Vision and Applications. 2012. V. 23. No. 6. –P. 1059-1082.
16. Технології створення мультимедіа застосувань [Електронний ресурс] // Конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Інженерія програмного забезпечення» / Укладач О. О. Шумейко. – Кам'янське: ДДТУ, 2019 – 169 с.
17. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддингс – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
18. Garg K., Nayar S.K. Vision and rain [Text] // Intern. J. Computer Vision. 2007. V. 75. No. 1. P. 3–27.
19. Экземпляр П. А. Устойчивые численные методы математического моделирования задачи восстановления искаженных изображений [Текст] : диссертация кандидата техн. наук : 05.13.18 / Экземпляр Роман Алексеевич. – СПб., 2018. – 125 с.
20. Zhang X., Li H., Qi Y., Leow W.K., Ng T.K.: Rain removal in video by combining temporal and chromatic properties [Text] // In: Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Multimedia and Explosion, pp. 461–464 (2006).
21. Garg K., Nayar S.K. When does a camera see rain? [Text] // in Proc. ICCV 2005. V. 2. P. 1067–1074.
22. Garg K., Nayar S.K. Detection and removal of rain from videos [Text] // in Proc. CVPR 2004, V. 1. P. 528–535.
23. Kratz L., Nishino K. Factorizing scene albedo and depth from a single foggy image [Text] // In: Proceedings of 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, pp. 1701–1708.
24. Barnum P., Narasimhan S.G., Kanade T. Analysis of rain and snow in frequency space [Text] // International Journal of Computer Vision. 2010. V86. P. 256–274.
25. Zelnik-Manor L., Machline M., & Irani M. Multi-body factorization with uncertainty: Revisiting motion consistency [Text] // International Journal of Computer Vision. 2006. V68(1). P. 27–41.

Received (Надійшла) 17.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2023

Improving the system of visual detection and overcoming obstacles for unmanned aerial vehicle

Yulija Tolkunova

Abstract. Most critical tasks are performed by unmanned aerial vehicles (UAV) under the control of an operator. However, the interaction of a robot and an operator in modern conditions is no longer management in the traditional form. Modern UAV are equipped with technical vision systems, databases and knowledge, on the basis of which the aircraft can make decisions independently. The robot's knowledge base allows it to independently navigate the environment and make decisions regarding the completion of the assigned task. The functions of the human operator now consist of setting tasks for the robot in a problem-oriented language, close to natural, and observing the actions of the robot. Visual planning is an extension of planning and obstacle avoidance methods for tasks in which the source of information about the environment is technical vision systems based on video cameras or scanning systems. The article provides an overview of visual planning methods. A large number of existing image processing methods and algorithms and their possible combinations make it possible to solve a wide variety of problems, to constantly improve existing algorithms and thereby increase the efficiency of image processing. But whatever method is used for visual planning, there are problems of obtaining quality input information related to meteorological conditions caused by precipitation and fog, and glare if the image is obtained using a video camera. It can be sun glare or glare from other lighting sources. The article proposes a technique for detecting and removing reflections from the image. Since the basic information about the environment that the robot analyzes depends on the quality of the image, appropriate methods that take atmospheric precipitation into account are needed. The article analyzes the methods of excluding various types of precipitation from the image and draws conclusions about the state of their development.

Keywords: unmanned aerial vehicle, overcoming obstacles, visual planning, glare detection, atmospheric precipitation, image processing.

S. Alosyn, O. Haitan

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

NEURAL NETWORK SUPPORT FOR AUTOMATION OF OBJECT CONTROL WITH MULTIFACTORIAL INPUT UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

Abstract. High dimension of the factors, their noisiness, subjectivity of the human factor breed high uncertainty in the implementation of effective monitoring and productive management in the areas of production and consumption, and hinder the optimal decisions making. In these conditions, it is appropriate to apply intelligent data analysis procedures based on artificial neural networks. Purpose of the study is to substantiate the technology for constructing of effective neural network models for automatic assessment of the object states and their control by finding the optimal values of input factors based on the analysis of the initial set of retrospective data. The desired product is set of neural network models for simultaneous assessment of the current object states and the calculation of the input factors values that ensure the achievement of the required objective function indicators. To automate the processes of recognizing the states of the study object and adapting the factors that bring the current state to the target one, a functional dependence of the states and factors is found based on forced learning of a synthesized models ensemble. The proposed technology and technical tools make it possible to automate the processes of classifying the states of the study objects, adapt the input factors to the target states, and evaluate the quality by model testing. The practical significance of the study results is in the creation of a universal toolkit for a whole class of objects in the tasks of automatic state classification and search for input factors space that is adequate to the target state space. Functionally, the ensemble of trained models can be implemented as a data analysis software unit in the format of two subsystems: for recognizing the states of the study object and adapting input factors to target states. Automation of the state classifying tasks and adapting the input set in the proposed technology that is performed on the basis of standard technical data analysis packages, makes it possible to increase the efficiency of decision-making and reduce financial costs in the implementation of industrial and commercial projects.

Keywords: automatic state classification, data analysis, input factor vector, neural network, objective function.

Introduction

Nowadays enterprises, organizations, and companies are objects that function, develop, and modernize, solving certain target tasks in a competitive environment, in conditions of lack of data or insufficiently reliable, distorted information.

In the decision making theory, these conditions are characterized by high entropy, the multidimensionality of the input factor vector, the impact of a noisy external environment that makes it difficult or, in some cases, prevents effective monitoring and management in the organization's life activity.

However, automation and digitalization of social spheres is a modern sustainable trend that requires search for the scientific and engineering solutions for the transition to a new technological level through the introduction of information technologies at all stages of the value chain of products and services. Main objective of this process is to increase the competitiveness and efficiency of the enterprise. Deep digitalization involves the introduction of new information technologies into production and management, promoting the development of promising direction in these technologies – neural network control under multifactorial input action in uncertainty [1, 2].

Task statement

High dimension of the factors, their noisiness, the subjectivity of the human factor breed high uncertainty in the implementation of effective monitoring and

productive management in the areas of production and consumption, and hinder the optimal decisions making.

In these conditions, it is appropriate to apply intelligent data analysis procedures based on artificial neural networks [3–8]. This choice is due to the important pragmatic advantages of neural network technologies:

- neuromodels are learning systems that extract information about real states from retrospective data under conditions of hidden, incomplete and noisy parameters and implicit, fuzzy connections between them;

- their using is based on the neural network training to extract information from retrospective data, which ensures consistency and objectivity of the results.

However, a universal software base for automating of monitoring and management of the study object is not provided in open publications. For each subject area, it is necessary to synthesize its own models that take into account power of the sample of precedents, their information content, types of variable and their dimensions, cross-correlation, distribution and amplitude swing.

Therefore, in this situation the neuromodel synthesis is based on a creative approach in choosing the network type, its complexity, learning method, activation function, initial conditions, etc. The complex of these measures contributes to the creation of productive technological maintenance and software for the neuromodel syntheses that allow automating the monitoring of the state of the study object and control of

this state to get the required parameters of the objective function [3,4].

Purpose of the study is to substantiate the technology for constructing of effective neural network models for automatic assessment of the object states and their control by finding the optimal values of input factors based on the analysis of the initial set of retrospective data. The desired product is neural network models for simultaneous assessment of the current object states and the calculation of the input factors values that ensure the achievement of the required objective function indicators.

Formulation of the problem

Let's consider a two-stage operation mode of the synthesized model: assessment of the current state of the study object and search for input factors values adequate to the desired target state of the object. Then the formal synthesis problem can be represented by the expression:

$$\text{Sup } K_E(S, P, X), \mathfrak{R}_u(\delta) \leq B_0, \quad (1)$$

where P is set of predictions of possible states of an object; X is set of input factors; K_E is a decision efficiency criterion; $\mathfrak{R}_u(\delta)$ are expected losses from errors; B_0 are allowable losses (limitations).

Thus, based on expression (1), it is necessary to find an analytical form of the relationship between the states of the study object with the input factor vector and the efficiency criterion of the made decisions, and then apply the mathematical apparatus for analyzing this relationship in order to determine the set of adequate control factors from the input set.

Solving of the problem

First, let's solve the problem of the current state recognizing.

According to the condition of the problem, there is a set of input data, including a list of factors-features in this subject area W , where

$$W = \{\omega_g\}, g \in \bar{I} = \{1, 2, \dots, I_m\}$$

and fixed their belonging to the classes

$$\Omega_p, \Omega_g = \{1, 2, \dots, J_i\}.$$

When an object for analysis arrives, the problem of assigning it to a particular class is solved with some errors. The grouping of objects, taking into account the analysis of the compactness of their features, can be formally represented by the expression

$$F = A(\omega, \{\omega_g\}), \quad (2)$$

where $A(\omega, \{\omega_g\})$ is a rule for assignment of the object state ω_g from state set ω to a class $\Omega_k: \omega_g \in \Omega_k$ on condition that

$$A(\omega, \{\omega_g\}) = \max_i A(\omega, \{\omega_i\})$$

and $B \leq B_0$.

In this case, objects should be grouped in the format

$$\mathfrak{R}_0(\omega_{pk}, \omega_{gi}) = \sum_{j=1}^N (x_{pk}^{(j)} - x_{gl}^{(j)}).$$

It is a metric of feature compactness in classes p, g at analysis of k, l objects of j type.

So, we have a generalized optimization problem of analyzing the current state of an object in the language of its features.

The second stage of synthesis is creation and application of the technology for adapting of input factors to the desired state of the study object. A similar problem has already been solved and the results are presented in the paper [4]. Let's use them by changing the input data, initial conditions and selected constraints, applying the well-known technology for a new purpose.

This procedure is reduced to searching for an approximating dependence "state - factors", and then to establishing the values of the factors corresponding to the function target value. Formally, it looks like this:

$$F: X(t) \rightarrow Y(t) \Leftrightarrow Y_0(t) \rightarrow F_0: Y_0(t) \rightarrow X_0(t), \quad (3)$$

where $Y_0(t)$ is target vector of the object state; $X_0(t)$ is vector of adapted input feature values; F_0 is productive functional of modifying of the current input factors array to the desired set, adequate to the target state.

The current state of the study object ($y(x)$) is analytically connected with the feature dictionary according to [2]:

$$y(x) = \alpha \sum_{i=1}^H v_i (w_{i1}x_1 + \dots + w_{in}x_n + u_i), \quad (4)$$

where H is training sample power, α, v are neural network parameters, n is number of neurons, $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$ are weight coefficients of neurons.

The functional diagram of the implementation of (3) and (4) illustrates all the necessary mathematical operations of the task (Fig. 1).

At the direct propagation of signals, the problem of estimating of the object states is solved, and at reverse propagation the required values of input factors are found that are adequate to the target state specified by the problem condition. The well-known technology [4] is implemented to calculate error (residual) functions:

$$E(X) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (y_i(x) - y_{iz})^2$$

and the desired values of the input factors based on the calculation of the partial derivatives of the error function gradient by the variables of the input set (X):

$$X^{t+1} = X^t - \eta_1 \cdot \text{grad } E(X^t).$$

As a modeling tool, Statistic Neural Network module of the data analysis technical package Statistika.

Mathematical operations implemented according to the functional diagram (fig. 1) are invariant to the subject area of the study object, which significantly expands the use of this technology in various fields. In support of this statement, we give two examples from economics and medicine.

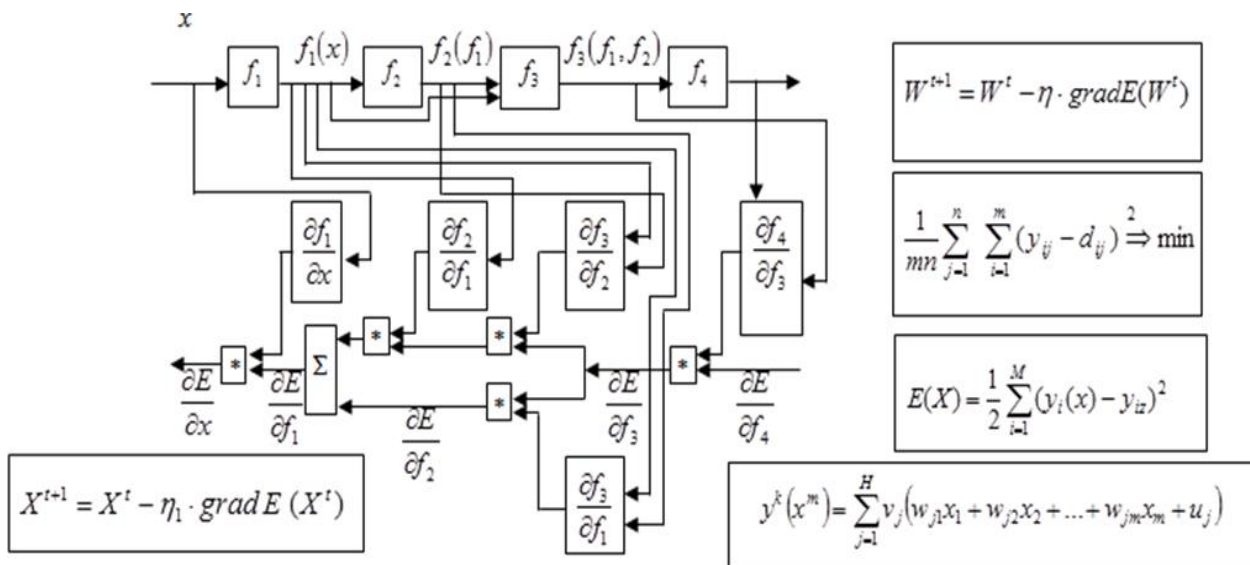


Fig. 1. Functional diagram of the implementation of synthesis of the recognition and adaptation model

In the first case, sixteen factors describe the enterprise state by classes: successful, bankrupt. In the second case ten factors describe the patient's condition by classes: healthy, unwell, sick. You can choose other subject areas.

It is only important to ensure multifactoriality, high uncertainty, noisiness, intersection of feature spaces, etc., that is, to fix a high degree of uncertainty.

The input data are presented in table 1 and table 2:

Table 1 – Standardized input set data (example 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Пер1	Пер2	Пер3	Пер4	Пер5	Пер6	Пер7	Пер8	Пер9	Пер10	Пер11	Пер12	Пер13	Пер14	Пер15	Пер16	Пер17
1	0.8837	-0.5479	0.2919	0.6792	-0.4415	0.6136	1.9925	0.9094	4.0435	0.8837	-0.5479	0.2919	0.6792	-0.4415	0.6136	0.8837	1
2	0.5883	-1.0988	-0.6074	0.6520	-0.3159	1.4419	1.7502	0.0522	0.1502	0.5883	-1.0988	-0.6074	0.6520	-0.3159	1.4419	0.5883	2
3	-0.0352	2.3186	1.4300	0.5840	1.1915	-1.2156	0.4696	0.7104	1.5660	-0.0352	2.3186	1.4300	0.5840	1.1915	-1.2156	-0.0352	1
4	-0.2896	-0.5173	-0.2702	-0.8574	-0.0088	1.8561	1.0580	-0.4834	-0.4611	-0.2896	-0.5173	-0.2702	-0.8574	-0.0088	1.8561	-0.2896	2
5	0.7934	-0.4663	2.1606	-0.0415	0.6053	1.7871	2.6156	-0.3610	0.5203	0.7934	-0.4663	2.1606	-0.0415	0.6053	1.7871	0.7934	1
6	-1.0444	0.9925	0.8117	-0.2183	1.1915	2.7707	4.1039	1.2767	0.2307	-1.0444	0.9925	0.8117	-0.2183	1.1915	2.7707	-1.0444	2
7	0.4488	2.0024	0.0389	-0.3135	0.8844	0.6654	-0.7073	0.3124	2.3704	0.4488	2.0024	0.0389	-0.3135	0.8844	0.6654	0.4488	1
8	0.6621	-0.1399	-1.0149	0.5296	-0.1344	-0.1802	-0.4996	-0.5600	-0.6542	0.6621	-0.1399	-1.0149	0.5296	-0.1344	-0.1802	0.6621	2
9	-0.1911	-0.6499	-0.3685	1.6446	1.4427	-0.1630	-0.7592	0.2971	-0.5255	-0.1911	-0.6499	-0.3685	1.6446	1.4427	-0.1630	-0.1911	1
10	-0.0352	-1.0580	-0.7619	-0.0823	0.2145	-1.1811	-0.1188	-0.4988	0.4237	-0.0352	-1.0580	-0.7619	-0.0823	0.2145	-1.1811	-0.0352	2

Table 2 – Standardized input set data (example 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Головний біль	Температура тіла	Біль у м'язях	Біль в животі	Сонливість	Локальні болю	Відсутність апетиту	Пультс	Чутливість рецепторів, %	Роздратованість	Здоров'я
1	0	36	0	0	1	1	0	65	100	1	1
2	1	37	1	0	1	1	1	70	95	0	3
3	0	36	0	0	0	0	0	69	60	1	1
4	0	37	1	1	0	1	1	85	78	1	3
5	0	38	1	1	1	1	1	89	69	1	3
6	1	39	1	0	0	1	1	95	75	0	3
7	1	35	0	1	1	0	0	66	98	0	3
8	1	36	0	0	0	1	0	68	100	1	2
9	0	36	0	0	1	1	1	76	87	1	2
10	1	40	1	0	1	1	1	105	72	0	3

The conducted experiments with the training of the synthesized models showed the results of modifying the weight coefficients acceptable for practice (Fig. 2, 3).

Fig. 4, 5 visualize the results of model training and confirm the stability of the error convergence process to the available minimum.

Fig. 2. Profile of the trained model (example 1)

Результаты: ЗдоровьеОбучающая

N	Архитектура	Произв...	Контр. ...	Тест. п...	Ошиб...	Контро...	Тестова...
1	МП 10:10-12-3:1	0,973684	0,837838	0,864865	0,2099...	1,128297	0,744081
2	РБФ 10:10-6-3:1	0,842105	0,648649	0,648649	0,3231...	0,402661	0,402994
3	РБФ 10:10-12-3:1	0,947368	0,783784	0,783784	0,2281...	0,332476	0,345076
4	Линейная 8:8-3:1	0,960526	0,918919	0,918919	0,1853...	0,236054	0,253447
5	Линейная 9:9-3:1	0,960526	0,918919	0,918919	0,1852...	0,235373	0,253308

Fig. 3. Profiles of the trained model ensemble (example 2)

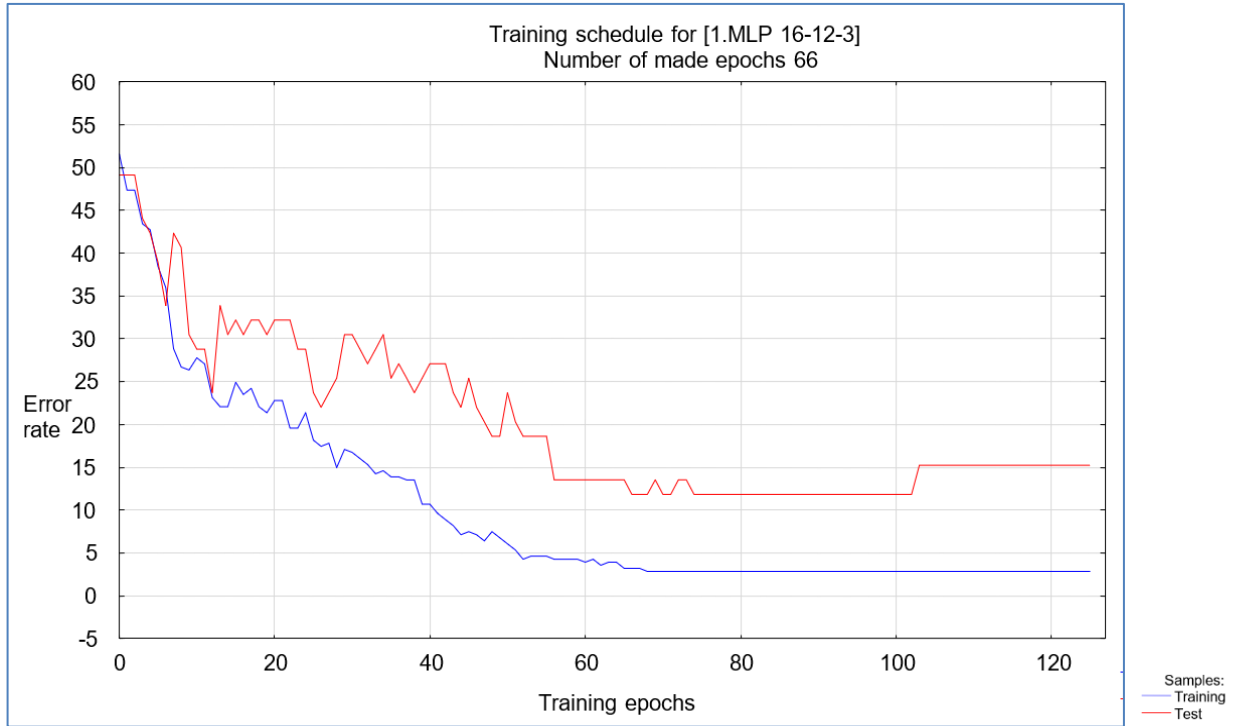


Fig. 4. Convergence of the learning process (for example 1)

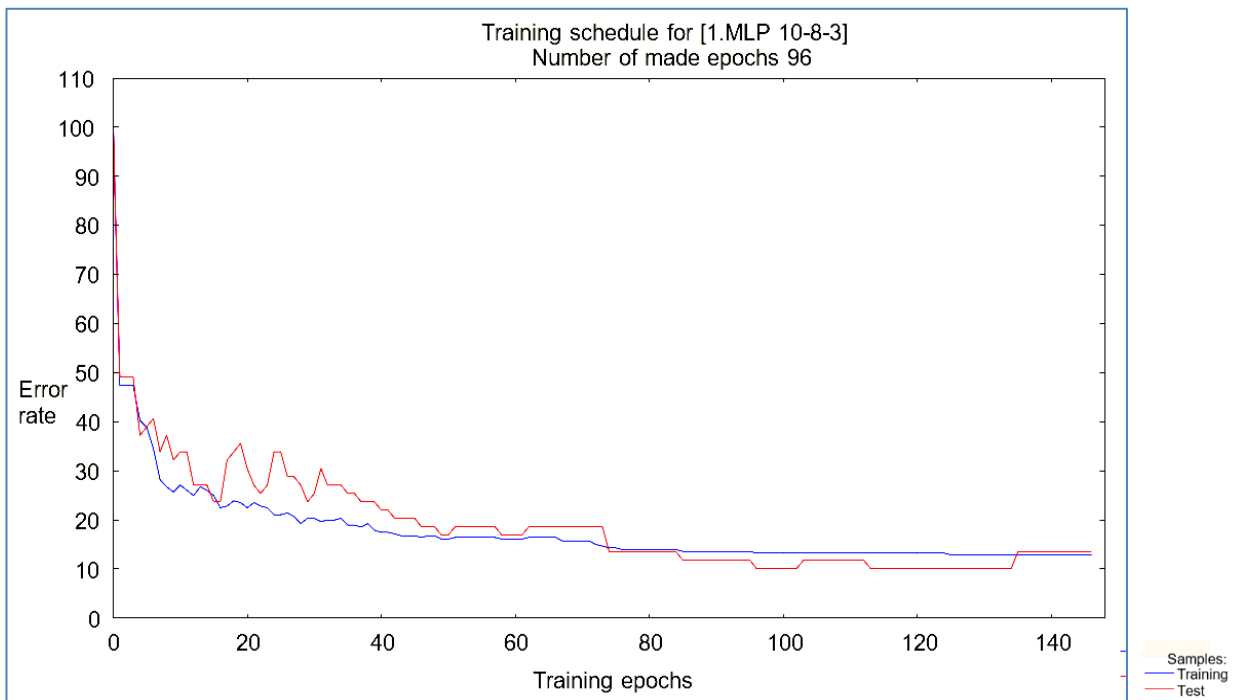


Fig. 5. Convergence of the learning process (for example 2)

The process of adaptation of input factors to the target object state is controlled by a standard neuroemulator procedure by implementing the options "User observations" - "User values".

In variety of the experiments, the adequacy of adaptation was confirmed.

Conclusions

1. To automate the processes of recognizing the states of the study object and adapt the factors that bring the current state to the target one, a functional dependence of the states and factors is found based on forced learning of a synthesized models ensemble.

2. The proposed technology and technical tools make it possible to automate the processes of classifying the study objects states, adapt the input factors to the target states, and evaluate the quality by model testing.

3. The practical significance of the study results is in the creation of a universal toolkit for a whole class of objects in the tasks of automatic state classification and search for input factors space that is adequate to the target state space.

4. Functionally, the ensemble of trained models can be implemented as a data analysis software unit in the format of two subsystems: for recognizing the study object states and adapting input factors to target states.

5. Automation of the state classifying tasks and adapting the input set in the proposed technology that is performed on the basis of standard technical data analysis packages, makes it possible to increase the efficiency of decision-making and reduce financial costs in the implementation of industrial and commercial projects.

REFERENCES

1. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. Prentice Hall, 2009. 906 p.
2. Buslenko N.P. Modeling of complex systems. 2nd Edition. - M.: Nauka, 1978. - 400 p.
3. Alosyn S.P. Neural network basis for decision support in the space of factors and states of high dimension. Poltava: Skytech, 2013. - 208 pp.
4. Alyoshin S.P., Haitan O.M. Intelligent Technologies of Strategic Enterprise Management in the basis of Artificial Neural Networks // Modern engineering and innovative technologies, - Karlsruhe, Germany, - 2020. - Issue 14. Part 2. - P. 24-29.
5. Borovikov V.P. STATISTICA NN - Technical description. M.: Mir, 1999. - 239 p.
6. Podorozhniak, A., Liubchenko, N., Kvochka, M., & Suarez, I. (2021). Usage of intelligent methods for multispectral data processing in the field of environmental monitoring. Advanced Information Systems, 5(3), 97-102. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.13>
7. Olizarenko S., Radchenko V. (2021). Method for determining the semantic similarity of arbitrary length texts using the transformers models. Advanced Information Systems, 5(2), 126-130. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.18>
8. Alyoshin S.P., Haitan O.M. Neural network modeling of the process of non-invasive screening-analysis of oxygen saturation providing the invariance to the impact of masking factors // Modern engineering and innovative technologies. - Karlsruhe, Germany, - 2021. - Issue 16. Part 2. - P. 83-89.

Received (Надійшла) 22.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.03.2023

Нейромережне забезпечення автоматизації управління об'єктом при багатofакторному вхідному впливі в умовах невизначеності

С. П. Альошин, О. М. Гайтан

Анотація. Висока розмірність факторів, їх зашумленість, суб'єктивізм людського фактору породжують підвищений ступінь невизначеності у реалізації ефективного моніторингу та продуктивного менеджменту сфер виробництва та споживання, перешкоджають прийняттю оптимальних рішень. В цих умовах доцільно застосувати інтелектуальні процедури аналізу даних у базисі штучних нейронних мереж. Мета дослідження – обґрунтувати технологію побудови ефективних нейромережних моделей автоматичної оцінки станів об'єкта та керування ними шляхом знаходження оптимальних значень вхідних факторів на основі аналізу множини ретроспективних даних. Шуканим продуктом є нейромережні моделі одночасної оцінки поточних станів об'єкта та розрахунку значень вхідних факторів, що забезпечують досягнення необхідних показників елементів цільової функції. Для автоматизації процесів розпізнавання станів об'єкта аналізу та адаптації факторів, що приводять поточний стан до цільового, знайдено функціональну залежність станів та факторів на основі примусового навчання ансамблю синтезованих моделей. Запропонована технологія дозволяє автоматизувати процеси класифікації станів об'єкта дослідження, адаптацію вхідних факторів до цільових станів та оцінити якість тестування моделей. Практична значимість результатів дослідження полягає у створенні універсального інструментарію для цілого класу об'єктів у завданнях автоматичної класифікації їх станів та пошуку простору вхідних факторів, адекватних простору цільових станів. Функціонально ансамбль навчених моделей може бути реалізований як програмний блок аналізу даних у форматі двох підсистем: розпізнавання станів об'єкта дослідження та адаптації вхідних факторів до цільових станів. Автоматизація завдань класифікації станів та адаптації вхідної множини на основі запропонованої технології, що виконується на базі стандартних пакетів технічного аналізу даних, дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень та знизити матеріальні витрати при реалізації виробничих та комерційних проектів.

Ключові слова: автоматична класифікація станів, аналіз даних, вектор вхідних факторів, нейронна мережа, цільова функція.

Vasyl Vasiuta, Artem Danyleiko, Viktoriia Vasiuta

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

CONCEPTUAL APPROACHES OF ORGANIZING PROCESSES OF VERIFICATION OF SOFTWARE PROJECTS OF CRITICAL INFORMATION-CONTROLLED SYSTEMS ON THE BASIS OF REQUIREMENTS FOR THEIR LIFE CYCLE

Abstract. The implementation of an effective technology to ensure the required level of quality of software systems is one of the urgent and important tasks of software engineering. It is especially important to solve this problem for critical information management Ukrainian nuclear power plants. Ensuring the required quality of software systems requires an understanding of the process of organizing the verification of software projects. The purpose of this study is to review the main conceptual approaches to the organization of verification processes for software projects of critical information management systems based on the requirements for their life cycle. To achieve this goal, the authors considered the automation of Ukrainian nuclear power plants in the form of software and hardware complexes and the general principles for the implementation of critical information management systems based on programmable logic controllers, analyzed the processes of verifying the user's applied logic in these systems, reviewed the main procedures for verifying the applied logic of a special RadiCS platforms.

Keywords: software and hardware complex, critical information management system, programmable logic controller, verification.

Introduction

At present, the creation of high-quality software is one of the most important tasks in the development of science and production. The viability of the system ultimately depends on how successfully the software is made. However, due to the fact that only some of the essential properties of software can be directly measured and quantified, ensuring an appropriate level of quality is of paramount importance.

Thus, one of the urgent and important tasks of software engineering is the implementation of an effective technology to ensure the required level of quality of software systems. The solution of this problem is especially important for critical information management systems of domestic nuclear power plants. To ensure the high quality of software systems, it is necessary to have an understanding of the process of organizing the verification of software projects.

The purpose of the study is to review the main conceptual approaches to the organization of verification processes for software projects of critical information management systems based on the requirements for their life cycle.

To achieve the set goals it is necessary:

- consider the automation of nuclear power plants with the help of software and hardware systems;
- to study the general principles for the implementation of critical information-controlled systems based on programmable logic controllers;
- to analyze the processes of verification of the user's applied logic in critical information management systems based on programmable logic controllers;
- review the main procedures for verifying the application logic of the RadiCS special platform.

The main part of the article

Automation of nuclear power plants (NPP) by means of software and technical complexes. Software and hardware complexes (SHC) belong to automated

systems. An automated system is a system consisting of personnel and a complex of means of automating its activity, which implements information technology for the performance of established functions. The software and hardware complex of automatic regulation, unloading and limited power of the reactor and accelerated warning protection (SHC ARP-ULP-AWP) using the RadiCS platform, intended for use as a technical base for the reconstruction of existing and creation of new control and protection systems with the VVER reactor.

The hardware platform of the ARP-ULP-AWP system and PTK was developed in accordance with the current rules and recommendations of the International Electrotechnical Commission (IEC), the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the National Research Council of the USA. Continuous diagnostics of the system is provided by integrated diagnostic devices, which are serviced regardless of the working scheme of security and unified coding.

SHC performs the following main functions:

- automatic regulation of the neutron power of the reactor and/or pressure in the main steam collector of the turbine of the NPP power unit;
- deloading and limitation of reactor power at the levels correspond to the volume of the main technological equipment of the NPP power unit included in the work;
- accelerated warning protection (quick discharge of the reactor to 40-50% capacity in 3-4 seconds) in case of unauthorized shutdown of the equipment.

To increase the reliability of protection operation, three levels of output signal generation based on the "two out of three" majority logic are implemented in the SHC ARP-ULP-AWP. If a licensing procedure is required, the system can be designed in a two-out-of-four configuration according to quality and reliability parameters. When designing the SHC ARP-ULP-AWP, the principles of dividing the functions of the complex into control and protection were initially laid down.

Different groups of functions are implemented in separate, galvanically separated sub-blocks, which increases the operational reliability of the complex as a whole.

General principles for the implementation of critical information management system (IMS) based on programmable logic controllers (PLC). One of the options for using PLC is the field of industrial automation of various technological processes in large and small enterprises. The popularity of controllers is clear. Their use greatly simplifies the creation and operation of both complex automated systems and individual devices, including household ones. The PLC allows to reduce the development stage, simplifies the process of installation and debugging due to the standardization of individual hardware and software components, and also provides increased reliability during operation, convenient repair and upgrade if necessary [1].

It is generally accepted that the task of creating a prototype of a modern PLC appeared in the late 60s of the last century. In particular, in 1968 it was formulated by the leading specialists of General Motors. Then the company was trying to find a replacement for a complex relay control system. According to the received design assignment, the new control system must meet the following criteria:

- simple and convenient creation of technological programs;
- the ability to change the working control program without interfering with the system itself;
- simple and inexpensive maintenance;
- increased reliability at a reduced cost compared to similar relay systems.

Subsequent developments at General Motors, Allen-Bradley and other companies led to the creation of a microcontroller-based control system that analyzed input signals from process sensors and controlled actuator actuators.

Subsequently, the term PLC (Programmable Logic Controller, PLC) was defined in the EN 61131 (IEC 61131) standards. PLC is a unified digital control electronic system specially designed for use in industrial environments. The PLC constantly monitors the state of the input devices and makes decisions based on the user program to control the state of the source devices. The composition and principle of action are shown in Fig. 1.

A simplified representation of the composition and principle of operation of the PLC is well shown in Fig. 1. It can be seen from it that the PLC has three main sections:

- incoming;
- outlet;
- central.

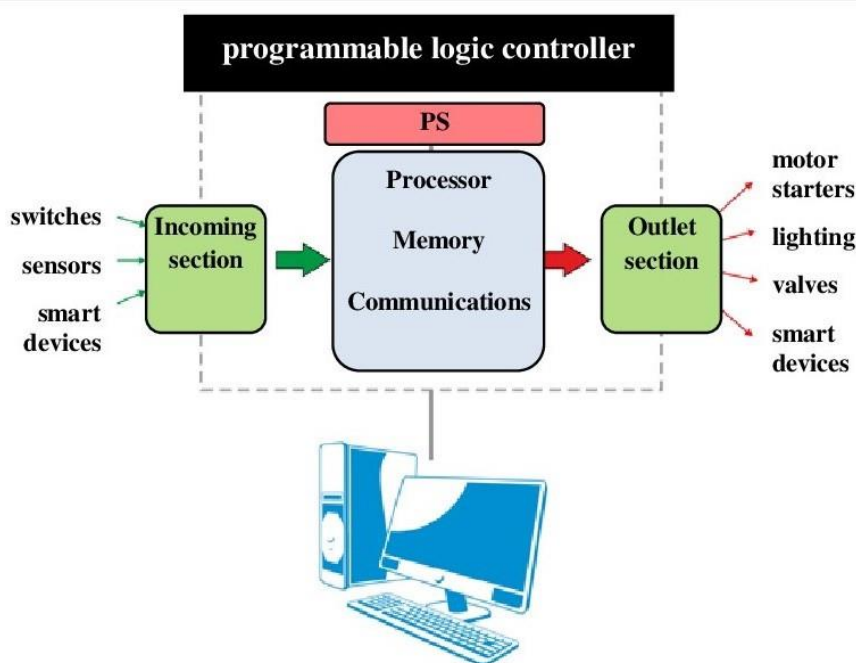


Fig. 1. Composition and principle of operation of PLC

The central section contains a central processor (CP), memory and a communications system. It processes the data received from the incoming data sections and transmits the processing results to the outlet section. It should be noted right away that in large PLC, in addition to the CP operating in the "master" mode, there may be additional "slave" PLC with their own CP. Standard microprocessors (MP) are used as the CPU of a small PLC. Usually, 8- and 16-bit MP fully cope with all standard tasks. But, as noted in IEC

61131, the choice of a specific MP still depends on the tasks assigned to this type of PLC.

To transfer data to another PLC or to connect to PROFIBUS, Industrial Ethernet, AS-Interface data transmission networks in distributed control systems today, communication processors such as DP83867IR manufactured by Texas Instruments (TI) are used.

The input section of the PLC provides input to the central section of the status of switches, sensors and smart devices. Through the output section, the CP

controls external executive devices, which may include electromagnetic motor starters, light sources, valves, and smart devices.

Modern PLC using innovative technologies have come a long way from the first simplified implementations of industrial controllers, but the universal principles embedded in the control system have been standardized and are being successfully developed on the basis of the latest technologies.

Today, the largest PLC manufacturers in the world are Siemens AG, Allen-Bradley, Rockwell Automation, Schneider Electric, and Omron. In addition to them, PLC are also produced by many other manufacturers.

According to the design, PLC are divided into monoblock and modular. A fixed set of inputs/outputs is placed in the body of a monoblock PLC along with the CP, memory and power supply. In modular PLC, separately installed input/output modules are used. According to the requirements of IEC 61131, their type and quantity may change depending on the task and be updated over time.

Monoblock functionally complete PLCs can include a small display and control buttons. The display is designed to display current operating parameters and is entered using the buttons of operating program commands and technological settings. More complex PLC are combined from separate functional modules, together they are fixed on a standard mounting rail. Depending on the number of serviced inputs and outputs, the required number of input and output modules is set.

The power supply can be built into the main PLC unit, but more often it is made in the form of a separate power supply unit (PS), which is attached to a row on a standard rail.

The initial source for the PS is most often the industrial network 24/48/110/220/400 V, 50 Hz. Other PSU models can be used as a primary source of constant voltage at 24/48/125 V. PS output voltages of 12, 24, and 48 V are standard for industrial equipment and PLC. In systems of increased reliability, it is possible to install two special reserved PS for duplicating the power supply.

The basic principle of PLC operation is cyclical work, in which the controller executes separate commands one after the other in the sequence in which they are written in the program. At the beginning of each cycle, the program reads the state of the controller's input and writes them down. After executing all the commands and determining the count of the state of the outputs relevant for the given situation, the controller writes the state of the outputs into the memory, which is a table of the state of the process outputs, and the operating system sets the corresponding signals to the outputs that control the actuators. Consequently, all signal combinations are fed into the input module of the controller, and the program monitors their pattern and reacts to changes in the output states based on the built-in algorithm.

Analysis of user application logic verification processes in PLC-based information and control systems. The reliability and security of critical

information management systems largely depend on the quality of the software that performs critical functions. Latent bugs (bugs not discovered during testing and validation) in critical software are risk factors for system failure.

An independent review of critical software that confirms the performance of the declared functions and provides an assessment of the likelihood of hidden errors is a necessary condition for regulatory requirements for various industries.

From this point of view, the main problems are: the reliability of independent verification, the assessment of the reliability of latent defects, the completeness of test coverage for critical software and, therefore, the quantitative assessment of functional safety.

Independent review and validation is a key method for qualifying critical software. Implementation is a legal requirement in critical areas such as nuclear power ("Software for Computerized Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants" - IAEA Safety Standards Series) and the space industry (ECSS-Q-40B, ECSS-Q-80B)) other.

An independent review as part of the ICS software qualification tests determines the actual ability to guarantee the required level of security and quality of ICS for critical programs in general.

The work of ISO is based on procedures known as ISO/IEC. Translation from English "Verification" gives it a clear interpretation: Verification - Verification [2]. To help you understand this, here is an example of a typical test: testing a program or a test device. Tests are carried out in accordance with certain requirements for the item being tested and it is recorded that the requirements are met. The result of the check is the answer to the question "Does the object meet the requirements?".

Checking allows for timely corrections and warnings.

Measures to eliminate inconsistencies have been identified to avoid or minimize claims from external and internal consumers, to improve the operating conditions and use of the test element.

Hidden bugs in critical software are a major risk factor for emergencies throughout the system. Independent verification of critical software is a mandatory requirement of the international regulatory framework.

The purpose of verification is to ensure that an object (request or program code) is verified and implemented without unexpected features.

There are two main methods for validating and analyzing systems in validation and testing processes: validation and automated analysis are static methods that can be performed at all stages of the system development process, and testing is a dynamic method that is performed when the program is already created in place, then is at the stage of implementation of the system and after its completion.

Testing is the process of running a program (or part of a program) in order to find errors. Debugging is not a type of testing. Although the words debugging and

testing are often used interchangeably, they refer to different activities. Testing is an activity aimed at identifying errors.

The purpose of a correction is to determine the exact nature of a known error and then correct the error. These two activities are related - the test results are the input for debugging. All proofs of system safety are based on the following assumption: The number of faults in the system leading to emergency situations is much less than the total number of faults in the system. Security should be focused on identifying potentially dangerous bugs. If it is found that these errors do not appear or do not appear but have no serious consequences, the system is considered reliable. The necessary prerequisites for a high level of reliability and safety of critical software are the availability of appropriate (effective) regulatory and methodological support, as well as the widespread use of tools to support qualification testing (expertise) processes, which reflects the modern dynamics of standardization in the development of information technology and software. The main direction of improving the reliability of ICS software quality assessment for critical use in qualification tests is the diversification of verification technologies.

The fulfillment of these conditions determines the real possibilities to guarantee the necessary level of security and quality of the entire information and control system, as well as within the framework of risk-based security regulation approaches.

The quality of ICS software for critical programs, given the risks of hidden software errors, is an urgent part of the implementation of approaches to safety regulation and qualification of ICS for critical programs in various fields of application (nuclear power plants, space, transport, etc.).

The first stage of the review is to perform a static code analysis (SCA) and code review (code review - CR) in the SW language. This code can describe an electronic design (ED) or its functionally complete components intended for the configuration of integrated circuits FPGA, CPLD, ASIC, for example, Function Block Library (hereinafter - ED). The SCA and CR method for a SW code (hereinafter referred to as SW-SCA/CR) is used to check whether the analyzed code complies with the encoding rules.

The SW SCA/CR process is used to verify that there are no coding errors and to ensure the efficiency of electronic design development.

The SCA/CR-SW procedure is applicable to an ED for which the coding step [3] has been completed.

Composition of the independent verification team for the SCA/CR-SW.

The SW SCA / CR process is carried out by an independent group of verification specialists (hereinafter referred to as the group) who did not participate in the development of IDEs, who have the necessary knowledge, skills and experience in developing (synthesis) and reviewing the code of functionally complex IDEs.

The ED code is generated in the design environment (tool) for a specific type of FPGA. The

certificate(s) must be available for such tool (IC) and, if possible, the IC approval made when selecting an IC for an IDE design is not part of the described SW SCA/CR processes in this procedure. Functional safety data package certified by an independent certification body - TÜV Rheinland Group.

After creation (synthesis, development), preliminary simulation of the functional test and debugging of the specified ED code, the following is submitted to the verification team leader for direct SW SCA / CR in the specified order as decided by the IDE development team leader:

- a complete set of valid technical design documents that will be used as input for the development of the IDE code (including specifications for product development, product concept, product architecture description);

- a list and a brief description of the functional libraries of plug-ins by developers of the ED code in the ED design environment and a description of the procedure for connecting (disconnecting) these libraries when developing code subject to SW SCA;

- A complete electronic copy of the functional plugin libraries used by ED code developers in the ED design environment when developing code subject to SW SCA.

Preliminary ED design submission (e.g. Architecture Description (AD) or Detailed Description (DD) submission) is an optional step in the SCA/CR-SW procedure when the developer submits the ED design informs the SCA/verifiers. CR SW. The verification team leader is responsible for identifying the needs and planning for this phase.

The pre-submission of the IDE project should be done taking into account the large size and complexity of the IDE project and the lack of knowledge of the reviewers.

An IDE project preview should always be performed (including a resubmission) whenever new documents are created or changes are made to the original documents required by SW SCA/CR.

The initial criteria for the SW SCA/CR level is approval by the auditors for a satisfactory meeting, with a preliminary presentation of the draft IDE in the form of minutes of the meeting drawn up by the audit team leader.

Having received all accompanying and descriptive documents for the developed IDE code (in paper and/or electronic form) and complete, exact electronic copies of the developed IDE code, approved by the appropriate officials, and everything is in development with a design environment associated with the functional libraries environment code (in electronic form) the verification team leader executes the detailed plan in strict accordance with the overall verification and validation plan and allocates roles and responsibilities for the direct implementation of SW SCA / CR in the member team.

Planning consists of identifying the units underlying the SCA/CR SW and determining the time required to complete the SCA/CR SW. The SCA/CR-SW schedule should include the date and time of the

SCA/CR-SW and the composition of the verification team.

The planning phase ends when the following criteria are met:

- SW SCA/CR plan developed;
- If it is not possible to determine the exact dates of some phases of the plan, SW SCA/CR should indicate the limits of possible dates.
- The SCA/CR-SW plan indicates sufficient resources.
- compiled SW schedule;
- Responsibilities are distributed among auditors.

The primary responsibility for SW CR implementation lies with the verifiers.

The input criteria for the SW CR verifier are:

- the pre-submission of the IDE project, if necessary, has been successfully completed;
- descriptive documentation for the developed IDE code;
- necessary carrier materials are available for carrying out SW CR.
- The time required to complete the SW CR has been agreed with the test centers.

Tasks that need to be solved when performing SW CR:

1. Analyze the SW SCA results by examining the violations detected by the HD Designer IC.
2. Each examiner must indicate how long it takes to complete the SW-CR.

The start-up phase of the SW CR is completed when the following criteria are met:

- Each examiner completed an SW CR confirmation letter.
- Prepared questions, a list of inconsistencies and/or deficiencies identified in this IDE Code, and comments on the results of the SW SCA.

Analysis of SW SCA/CR results

During the meeting, which analyzes the results of the SCA/CR-SW, discusses the problems, the auditors identify nonconformities and/or deficiencies and decide on the degree of importance of the identified nonconformities and/or deficiencies. When discussing submissions that are subject to the SCA/CR SW, verifiers may identify new inconsistencies and/or deficiencies not identified during the SW CR. Options for addressing identified nonconformities and/or errors should not be discussed when reviewing SW SCA/CR results.

Responsibility for the formation of the results of the SW SCA / CR implementation rests with all verifiers.

The introduction criteria for a successful SW CR review meeting are:

- verifiers performing SW CR are fully present;
- Descriptive documents for the developed ED code were available for SW CR implementation.
- definition of the goals of the meeting to analyze the results of the implementation of SW SCA / CR.

Tasks that need to be solved during the meeting to analyze the results of code review:

1. A short introduction by the verification team leader, in which he should:

- ensure that all test facilities performing SW CR are aware of their responsibilities;

- if necessary, inform the members of the audit team about the structure of the SW SCA / CR procedure (Fig. 1) and the place of the SW CR in it.

2. Review of the level of preparation of examiners by the head of the examination group, consisting of:

- asking auditors about the time they spent completing the SW CR and the number and main types of errors and/or nonconformities identified in the review;

- Decide that the SW CR review session builds on all previously prepared comments and covers all aspects of the review.

3. Read the list of materials provided by the reader for SW CR.

4. Identification of inconsistencies and / or shortcomings by auditors:

- identify inconsistencies and / or defects based on the results of the SWCR;

- compare the obtained results of SW SCA with the results of SW CR and identify inconsistencies and / or errors for their further elimination (priority (significance) of the consequences of the identified inconsistencies of the specified safety requirements, which should be determined);

- assess the degree of impact of inconsistencies and / or shortcomings identified during the implementation of SW SCA / CR on other documents (organizations) previously created within the framework of the relevant project, and determine the need for their changes;

- If the auditors decide that the inconsistencies and / or shortcomings identified during the implementation of SW SCA / CR lead to a change in previously created documents (organizations) within the specific project under consideration, the head of the audit team initiates the change and processes it in accordance with the method described in the internal instructions;

- Do not discuss the style or options for correcting identified inconsistencies and / or shortcomings.

5. Recording of all disputes and/or deficiencies by the registrar, who must:

- indicate any detected inconsistencies and / or defects, indicating their place in the IDE code in question and the number of the violated rule;

- during or after the completion of the meeting to analyze the results of the implementation of the QA software, check the identified inconsistencies and / or shortcomings, in order to then submit them to the auditors for approval;

- record the time spent in the meeting to analyze the results of the SWCR implementation.

6. Determine the status of the ED code after making one of two possible decisions:

- if no nonconformities and/or deficiencies are identified, the SW CR result is approved as positive, and the verification team leader prepares a general report for SW SCA / CR regarding the procedure carried out and the results achieved;

- If inconsistencies and/or deficiencies are identified, a decision is made to further transfer the IDE code to the IDE development team for correction, and

then a re-SCA / CR SW is organized and the results of the intermediate analysis are turned into the results of the SW CR implementation in the form of an interim report or draft final reports.

The SW CR implementation meeting ends when the following criteria are met:

- if the ED code has passed the SW-CR procedure in the intended scope;
- inconsistencies and / or shortcomings were recorded, their location is clearly indicated in this material and this list is approved by the reviewers.

- If nonconformities and/or deficiencies are identified, the verification team leader presents the ED code and a list of nonconformities and/or deficiencies based on the results of the SCA/CR-SW to the ED code development team for remediation.

New SW SCA/CR.

The admission criteria for the updated SW SCA/CR implementation are:

- Developer has completed fixing inconsistencies and/or bugs in ED code and provided SCA/CR-SW for re-run.

- IDE code with corrected discrepancies and/or bugs sent to the head of the review team or the reviewer specified by him.

Tasks to be solved when repeating static code analysis and code review:

1. Run SW SCA again
2. Swipe SW CR again

3. The verification team leader prepares an overall report on the results of the SCA/CR-SW.

The SCA/CR-Re-SW phase ends when the following criteria are met:

- The ED code provided for the second SW SCA/CR has passed this procedure.

- no deviations and/or defects were found;

- If new inconsistencies and/or deficiencies are found, they should be sent back to the ED code development team for remediation (with subsequent resumption of SCA/CR SW) (including documented explanation of the causes of individual inconsistencies and/or deficiencies cannot be resolved). This decision will be agreed between the verification team leaders and the ED code development team.

- The results of the repeated SW SCA/CR are recorded in the general report on the results of the SW SCA/CR.

To complete SW SCA/CR you need:

- all identified inconsistencies and / or shortcomings have been eliminated or the reasons why individual inconsistencies and / or shortcomings cannot be eliminated are documented (the decision on the acceptability of such declarations is agreed between the leaders of the verification team and the ED code development team and is done together).

- The verification team leader completed and approved the overall SCA/CR-SW report.

The review of the SW SCA/CR procedure is the phase in which the causes of deficiencies identified during the SW SCA/CR are classified. This activity is an important step in preventing the appearance of such defects in future work.

The Verification Team Leader schedules a meeting following the SCA/CR-SW process. All examiners take part in this meeting.

Tasks to be solved at the meeting, taking into account the results of the SW SCA / CR procedure:

1. Select all errors from the SCA/CR SW report for discussion.

2. Determine the causes of the error.

3. Write down the results of this meeting. Recommendations may also be made to improve existing IDE development and/or code review procedures, which are then presented to the IDE code development team to further prevent bugs.

Procedure for recording SW SCA/CR results.

All measures to implement SW SCA/CR should be documented in detail and can be entered into a bug tracking system to record and control nonconformities and/or deficiencies and track the process of resolving these nonconformities and/or deficiencies. Upon completion of the SWA SC/CR, the verification team leader should prepare a report on the documentation of the results.

The SCA/CR SW report must contain:

- data about the object SW SCA/CR;
- IS attributes from SW SCA;
- description of the SW SCA/CR implementation procedure;

- Comparative analysis of versions of IDE components that fall under the SW SCA / CR procedure (prepared as an appendix to the main report).

- primary and intermediate results of SW SWA/CR, including: rule violations, comments, recommendations);

- the results of assessing the impact of inconsistencies and / or deficiencies identified during the implementation of the SW SCA / CR on other documents (companies) previously developed within the framework of the relevant project being considered (indicate the need to make changes) in accordance with the procedure described in the internal instructions);

- results of re-SW SCA/CR after conflict resolution (if found during SW SCA/CR)

If identified inconsistencies and/or errors are not corrected, the report must include an explanation of the reasons why the ED code maintainers remained unchanged (corrected) with respect to each such violation or comment, supported by the developer's signature.

The report must be presented in an accessible form that is understandable to professionals who have not participated in the SW SCA/CR.

Overview of the main procedures for verifying the application logic of RadiCS special platforms. An important part of instrumentation and control verification (I&CS) is the verification of a specific application logic (AL) system. This section discusses the verification tasks specific to AL for the I&CS-based RadiCS platform. Let us briefly describe the subject of the test.

The RadiICS platform consists of several types of modules based on the use of FPGA chips as computing,

processing and system internal control systems for each of the modules. In terms of its functionality and high-level flexibility, the RadiCS platform is essentially a safety PLC, except that the internal logic is executed by the FPGA instead of the processors [4–6].

The functionality of each module is driven by a common platform logic (PL) developed using an FPGA-specific IDE and implemented with hardware description languages. Developers of the I&CS-based RadiCS platform cannot influence the PL, so the PL review does not concern them. The PL of the RadiCS platform was verified by the platform vendor, RPC Radiy.

AL for I&CS is developed using a specialized IDE, the Radiy Platform Configuration Tool (RPCT). RPCT provides the means to manage large, complex I&CS projects. AL is implemented with a program-specific graphical language that is very similar to the functional block diagram language specified in IEC

61131-3 [7, 8]. Fig. 2 shows the AL fragment developed in RPCT.

The main components of AL are multifunctional application blocks (AFB). Each AFB allows the user to select and use certain functions within AL-projects: logical, mathematical, synchronization, etc. Each "graphical" AFB in RPCT is tied to a hardware-implemented AFB component in an FPGA-based logic module (LM), this component performs the specified function. When compiling, RPCT converts the graphical representation of AL into AL code, which is loaded into LM and executed at runtime.

Basically, the AL code consists of the following software instructions:

- 1) Reading data from allocated memory cells and transferring them to a certain AFB.
- 2) Executing the AFB function.
- 3) Record the results of the AFB function in the selected memory cells.

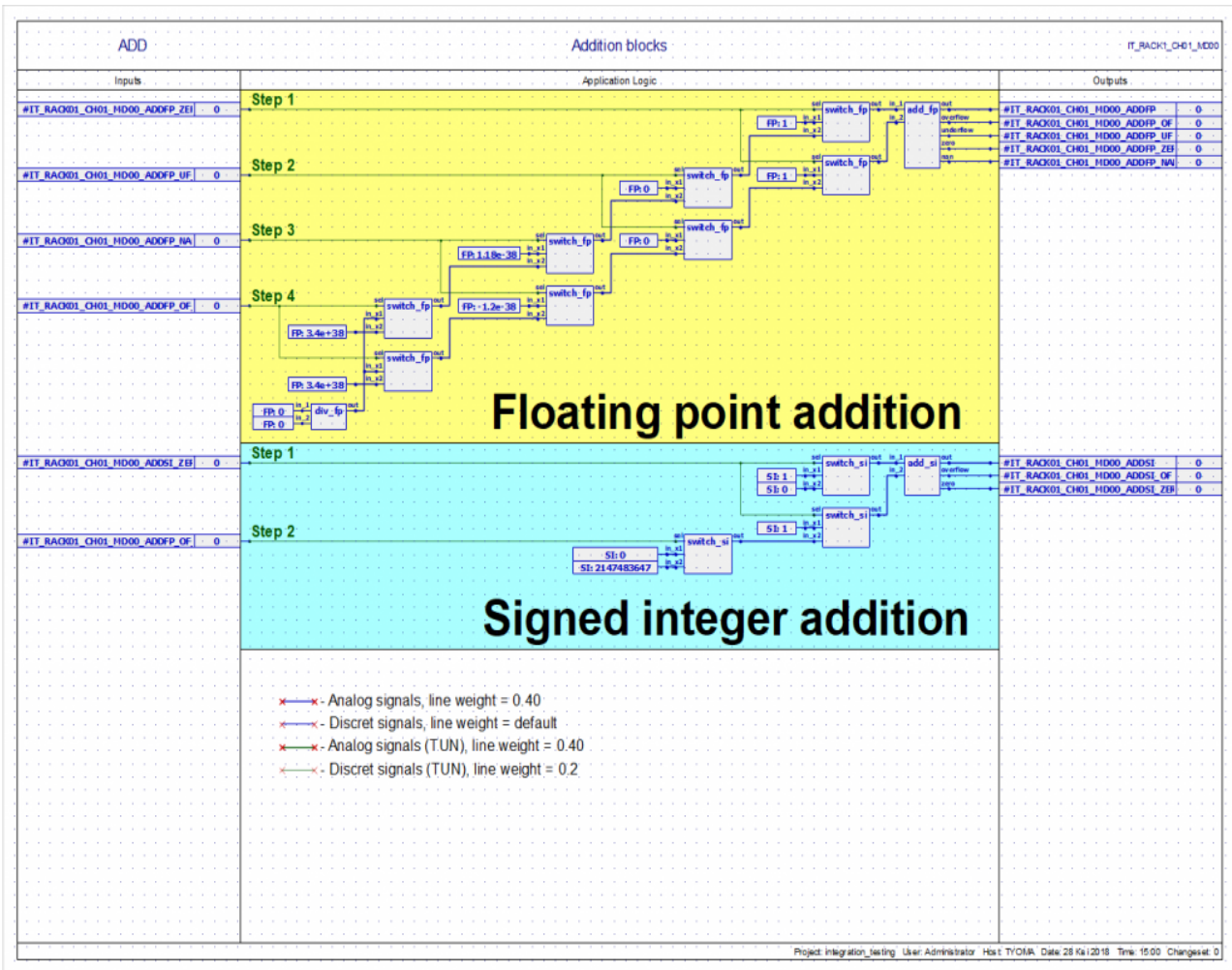


Fig. 2. Fragment of program logic, fragmentation of RPCT

In terms of data structure, AL Code is the hex code of Radiy's own assembler for FPGA-based LM.

The AL code also includes a readable part that is not loaded into LM and is for informational purposes only.

Fig. 3-4 show fragments of the logic code of the program (both parts).

The US NRC regulations, as well as the IEEE and IEC standards, provide requirements for software-related activities and supporting processes in the Safety Software Life Cycle (SLC) of nuclear power plant computerized I&CS. These standards define the different types of security-related software and the SLC requirements for each type of software.

```

"desc00001468": "1,true;07C0;028300060001;WRFBC       TCTC_VIBR.0[6], #1;tctc_vibr.in <= #1",
"desc00001469": "1,true;07C3;00830000;START       TCTC_VIBR.0;compute tctc_vibr @RP_MODEL_1995",
"desc00001470": "1,true;07C5;93030008840A0005;RDFBB       46090[5], TCTC_VIBR.0[8];#AUTO_SIGNAL_EPTCS_FSCC01_MD00_RP_MODEL_1995_OUT <= tctc_vibr.out",
"desc00001471": "1,true;07C9;A2C10003B40A0005;WRFBB       OR.0[3], 46090[5];or.in_1 <= #AUTO_SIGNAL_EPTCS_FSCC01_MD00_RP_MODEL_1995_OUT",
"desc00001472": "1,true;07CD;F2C10004B54A0002;WRFBB       OR.0[4], 46410[2];or.in_2 <= #PR_MODEL_RST",
"desc00001473": "1,true;07D1;78810000;START       OR.0;compute or @RP_MODEL_1994",
"desc00001474": "1,true;07D3;F3010014B40A0004;RDFBB       46090[4], OR.0[20];#AUTO_SIGNAL_EPTCS_FSCC01_MD00_RP_MODEL_1994_OUT <= or.out",

```

Fig. 3. The part that is understandable for a person

```

3297 |       "z_frame_0003": {
3298 |         "data0000": "fc40 07a8 0180 b400 ffff 5341 0016 00cf b600 b400 0000 cb42 0003 0067 7600 b400",
3299 |         "data0010": "0001 5b43 000e 00d0 1e00 b400 0002 7b44 0009 006a de00 b400 0003 7345 000b 006a",
3300 |         "data0020": "ce00 b400 0004 f346 0015 006b 0e00 b400 0005 bb47 0005 0068 6600 b400 0006 7b48",
3301 |         "data0030": "0026 0067 a600 b400 0007 2349 0025 0067 4600 b400 0008 bb4a 000c 006f 8600 b400",
3302 |         "data0040": "0009 334b 0015 0070 ee00 b400 000a 2b4d 000e 0068 3e00 b400 000c 134e 0010 006c",
3303 |         "data0050": "fe00 b400 000d 8b50 000d 0003 5600 b400 000f b100 e1b8 b400 0180 b400 ffff 1351",

```

Fig. 4. Hexadecimal byte code

The SLC framework for developing software using program-oriented languages is the most suitable for designing and testing AL from RPCT. The following

figure is adapted from Fig. 5 in IEC 60880 and illustrates the verification and verification activities of AL (V&V) [9].

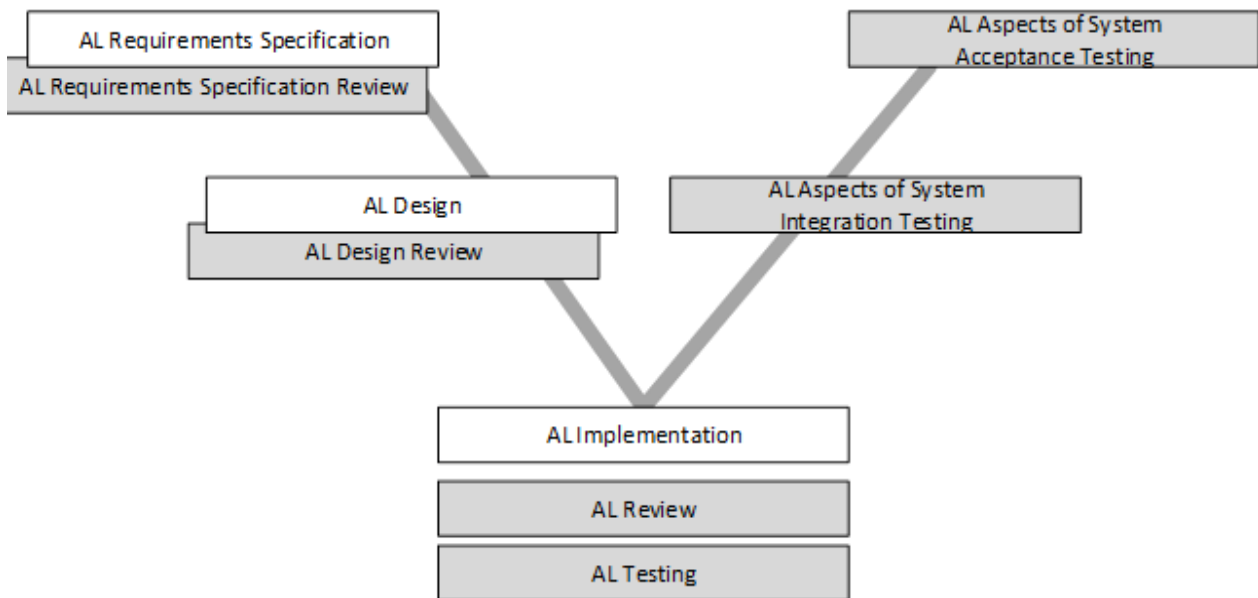


Fig. 5. Verification process and verification of program logic

As stated earlier, the AL design does not affect PL, so for a specific I&CS project, only AL needs to be tested and validated.

The top-level activities of AL V&V, such as requirements and design verification, system integration, and acceptance testing, have little to no strong specificity defined by the RadICS platform. In order to perform these top-level activities, the development organization must comply with the relevant V&V requirements for computer-based I&CS.

The AL implementation test is closely related to the language and design environment used. Therefore, this activity requires the use of specific tools and approaches.

Verification of the implementation of the QA may combine different verification tasks, such as analysis, inspections, tests or audits (depending on the requirements of the regulatory body). Viewing AL can be considered the least amount of verification effort, and can generally be sufficient for non-security applications. The combination of AL review and AL

testing can be considered as a sufficient area for the most applicable security programs.

The AL Review provides an objective assessment of the AL Code. The AL review determines whether the AL code correctly implements the AL design as specified in the design documentation. The AL review should be done as a systematic check of the software.

In order to facilitate AL review, the RadICS Verification Department uses a special tool, the RPCT Outputs Verification Tool (ROVT).

The AL code consists of 2 parts: a binary part that is loaded into the FSC LM and a text part that is easy to read; both are in JSON format (see Figure 2). The binary part of the AL Code is not human readable, so does not rely on direct examination of that part of AL. ROVT was independently developed by the RadICS Verification Department to convert the binary part of the AL code into a readable visualization representing the design intent and compare both parts to confirm their equivalence.

ROVT provides the following key features:

- ROVT can be used as a mitigation to allow the AL constructor (or verifier) to verify that the compiler is correct (ie that the binaries correctly implement the graphical logic design).

- ROVT allows you to compare AL designs and highlight differences in input/output signals and AFB usage, this feature can be used to evaluate changes when planning an AL test.

- ROVT is able to generate a data path tree back from the selected output to all inputs, this function can be used for impact analysis when planning an AL test.

- ROVT performs AL static analysis. Static analysis checks are performed automatically according to user-configurable security rules.

The purpose of AL testing is to provide verification of AL requirements by performing functional software tests. AL testing is performed using instrumental behavior modeling.

Conclusions from this study and prospects for further research in this direction

The RadiICS verification department currently uses the UAL Controller Test Framework (UCTF) for AL testing purposes. UCTF contains templates for

creating test inputs for AL tests, a testbed for running AL in a simulated environment, and templates for defining expected results and evaluating expected and actual results. UCTF is implemented in VHDL for ModelSim simulation. Therefore, the personnel of the verification team must have the skills and knowledge of designing and modeling VHDL.

For future use, Radiy is developing a dedicated tool in the RPCT – Simulator toolbox. The simulator executes (i.e. simulates) AL according to user-specified scenarios. The simulator can simulate user-defined parts of ALs or all ALs.

The simulator will allow the verifier to define test cases directly within the RPCT, a graphical representation of AL.

The Simulator will also support test automation in scripting languages and provide interfaces for integration with external systems (such as customer plant simulation systems). The prospect of further research in this direction is the development of software tools to improve the efficiency of using software tools for automated verification of the results of compiling software projects for critical information management systems.

REFERENCES

1. Nikolayenko A.M., Minyaylo N.O. Microprocessor and software tools for automation: Training manual/ A.M. Nikolayenko, N.O. Minyailo – Zaporizhzhia, ZDIA, 2011, – 444 c.
2. Striuk O., Shamanskyi V. User-Designed Application Logic Verification Approach and Tools [Electronic resource] – Access mode: <https://radics.tech/user-designed-application-logic-verification-approach-and-tools/>
3. IEC 61508-2010. Functional safety of electrical/ electronic/ programmable electronic safety-related systems – Part 7: Overview of techniques and measure.
4. RadICS platform [Electronic resource] – Access mode: <https://radiy.com/radics/>
5. Butko, I. (2021). The use of geospatial information by public authorities to support the decision making of management. *Advanced Information Systems*, 5(1), 39–44. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.05>
6. Davydov, V., & Hrebeniuk, D. (2020). Development the resources load variation forecasting method within cloud computing systems. *Advanced Information Systems*, 4(4), 128–135. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.18>
7. Khudov, H., Tahyan, K., Chepurnyi, V., Khizhnyak, I., Romanenko, K., Nevodnichii, A., & Yakovenko, O. (2020). Optimization of joint search and detection of objects in technical surveillance systems. *Advanced Information Systems*, 4(2), 156–162. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.23>
8. Tverytnykova, E., Demidova, Y., & Drozdova, T. (2021). Management system of occupational safety at Ukrainian enterprises: international and European dimension. *Advanced Information Systems*, 5(1), 45–53. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.06>
9. Software and technical complex of automatic regulation, unloading and limited power of the reactor and accelerated warning protection [Electronic resource] – Access mode: radiy.com/projectsnpp/programno-tehnichny-kompleks-avtomatichnogo-regulyuvannya/

Received (Надійшла) 24.12.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.02.2023

Концептуальні підходи організації процесів верифікації програмних проєктів критичних інформаційно-управляючих систем на основі вимог до їх життєвого циклу

В. В. Васюта, А. С. Данилейко, В. Б. Васюта

Анотація. Реалізація ефективної технології забезпечення необхідного рівня якості програмних систем наразі є однією з актуальних та важливих задач програмної інженерії. Особливо важливим є вирішення цієї задачі для критичних інформаційно-управляючих українських атомних електростанцій. Забезпечення необхідної якості програмних систем вимагає розуміння процесу організації верифікації програмних проєктів. Метою дослідження є огляд основних концептуальних підходів організації процесів верифікації програмних проєктів критичних інформаційно-управляючих систем на основі вимог до їх життєвого циклу. Для досягнення поставленої мети авторами було розглянуто автоматизацію атомних електростанцій у вигляді програмно-технічних комплексів та загальні принципи реалізації критичних інформаційно-управляючих систем на основі програмованих логічних контролерів, проаналізовано процеси верифікації прикладної логіки користувача в даних системах, здійснено огляд основних процедур верифікації прикладної логіки спецплатформи RadiCS.

Ключові слова: програмно-технічний комплекс, критична інформаційно-управляюча система, програмований логічний контролер, верифікація.

О. Г. Дрючко, В. В. Соловйов, О. В. Шефер, Н. В. Бунякіна,
М. К. Бороздін, В. М. Галай, О. М. Кульчій

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

ПЕРЕТВОРЕННЯ В РЗЕ- І ЛІТІЙ-ВМІСНИХ СИСТЕМАХ НІТРАТНИХ ПРЕКУРСОРІВ У ПІДГОТОВЧИХ ПРОЦЕСАХ ФОРМУВАННЯ ОКСИДНИХ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. Узагальнено важливі для практичного використання відомості про літєві координаційні нітрати рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи ізоструктурного ряду $\text{Li}_3[\text{Ln}_2(\text{NO}_3)_6] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($\text{Ln} - \text{La-Nd}$) – прекурсори перспективних сучасних багатофункціональних матеріалів – щодо умов їх утворення й існування, природи хімічного зв'язку, складу, будови, форми координаційних поліедрів Ln, типу координації ліганд, виявляємих характерних властивостей. Одержані дані (як первинна інформація) є основою для виявлення, ідентифікації, контролю фазового стану об'єктів перероблення у підготовчих стадіях, вибору критеріїв сумісності складових при формуванні одношарових і шаруватих наноструктурованих оксидних систем лантанодів і перехідних елементів різного призначення зі структурою дефектного перовскіта, граната у вигляді порошків, товстих плівок, об'ємної кераміки; розроблення різних комбінованих способів їх активації та встановлення технологічно-функціональних залежностей; керованого модифікування властивостей одержуваних цільових продуктів; оптимізації регламентів синтезу літій-провідних систем як електродів перезаряджаємих акумуляторів, електролітних мембран і сенсорів, елементів і приладових структур сучасних систем телекомунікації.

Ключові слова: літєві координаційні нітрати лантанодів, умови утворення, кристалічна будова сполук, характерні властивості, модифікування характеристик систем титанатів, плівкові літій-провідні тверді електроліти.

Вступ

Підвищена увага до складних оксидів зі структурою дефектного перовскіта (ABO_3) $(\text{Li,La})\text{TiO}_3$, $\text{Li}_{3x}\text{La}_{2/3-x}\text{Y}_{1/3-2x}\text{TiO}_3$ [1–6] і на основі граната $\text{Li}_5\text{La}_3\text{M}_2\text{O}_{12}$ ($\text{M} - \text{Nb, Ta}$) [7–9] зумовлена особливістю А-дефіцитної кристалічної решітки: наявністю у базових структурах достатньої кількості вакансій, що забезпечують вільну міграцію носіїв заряду – іонів літію, і каналів провідності, по яких здійснюється іонне транспортування. Ці особливості структур відкривають широкі можливості модифікування властивостей складних оксидів, оснований на катіонних заміщеннях і формуванні вакансій у катіонній чи аніонній підрешітках, з метою досягнення високої іонної провідності і швидкого іонного транспортування.

Дослідженнями також встановлено, що частковими гетеровалентними заміщеннями у підрешітці рідкісноземельних елементів можна впливати на фононний спектр [6]. Це дозволяє в межах однієї структури і близького хімічного складу змінювати властивості матеріалів від іонних провідників до ультрависокоочастотних (НВЧ) діелектриків і сегнетоелектриків-напівпровідників [10]. Реалізація вказаного підходу [11] дозволяє створення літій-провідних матеріалів з високою провідністю при кімнатній температурі ($\sigma \sim 10^{-3}$ См/см), використання подібних систем як твердих електролітних мембран, електродів у перезаряджаючих літєвих акумуляторах й електрохромних пристроях, в електрохімічних сенсорах, а також розроблення на їх основі матеріалів [10], що характеризуються відносно високими значеннями діелектричної проникності, електричної добротності, термостабільності електрофізичних властивостей у НВЧ діапазоні, для елементів і приладових структур сучасних систем телекомуні-

кації. Літій-провідні багатокомпонентні оксиди мають складну структуру, а синтез таких нанокристалічних матеріалів є непростю науково-технологічною проблемою.

Уявлення про будову таких багатокомпонентних оксидних матеріалів дає рис. 1, [1].

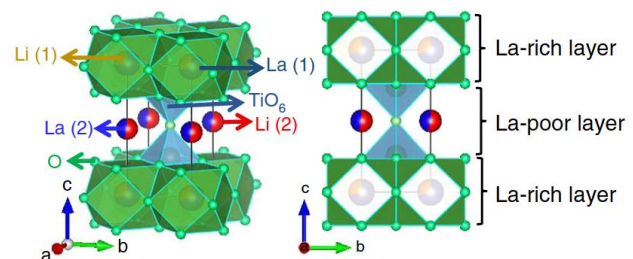


Рис. 1. Схематичне зображення кристалічної структури $\text{Li}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{TiO}_3$ (LLTO) за даними [1]

Їх кристалізація відбувається в міцній структурі типу перовскіту, що складається з октаедричного каркасу TiO_6 , стабілізованого атомами La, і має велику кількість вакантних місць у незайнятих позиціях, які можуть брати участь у зберіганні та транспорті Li [5]; в уточненій структурі є дві нерівнозначні багаті та бідні позиції La, поперемінно розташовані вздовж осі c. Встановлено, що іонна провідність LLTO в основному залежить від розміру катіону іона А позиції (La або рідкісноземельного, лужного або лужноземельного), концентрації літію та вакансій, а також від природи зв'язку B – O.

За результатами досліджень [11] такий літій-лантановий титанат зі структурою перовскіту $\text{Li}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{TiO}_3$, синтезований за допомогою твердофазних реакцій, може бути віднесений до перспективного високоефективного сімейства анодних матеріалів для високошвидкісних літій-іонних акумуляторів (ЛІА) [12]. При середньому потенціалі близько 1,0

В, порівняно з Li^+ / Li , цей анод демонструє високу питому ємність 225 мА·год./г і витримує 3000 циклів із оборотним фазовим переходом. Без зменшення розміру частинок з мікро- до наномасштабу його швидкісні характеристики перевершують комерційний наноструктурований $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.

Ці матеріали широко досліджені у вигляді об'ємних зразків, але практично відсутні дані про синтез та дослідження їх електрофізичних властивостей у вигляді плівок. Саме тому розробка акумуляторів для живлення автономних пристроїв у системах телекомунікацій, медицині, автомобілебудуванні і синтезі літійпровідних матеріалів у вигляді плівок, які можна буде використовувати як твердий електроліт для твердотільних акумуляторів, є актуальним.

Тонкі плівки отримують в основному з допомогою фізичних методів синтезу, таких як радіочастотне (RFS) та магнетронне напилення (RFMS), товсті плівки – методами “screen printing”, лазерного структування, нанесення з допомогою світлочутливої пасти і “tape casting”. Кожна технологія має свої особливості і сфери найбільш ефективного використання. За даними [13] для отримання товстих плівок з товщиною більше 10 мкм оптимальним є метод “tape casting” (лиття, різновид рішень «м'якої хімії»). Нині для запобігання літєвих втрат і відтворення монофазних зразків з регульованою упорядкованістю катіонів і вакансій у кристалографічних позиціях структур перовскітів розробляють низькотемпературні методи «м'якої хімії» з використанням рідких багатокомпонентних нітратних систем [14, 15]. Механізм формування наночастинок у таких умовах із фізико-хімічної точки зору достатньо складний і може включати процеси, що протікають паралельно – гідратації (сольватації), асоціації, комплексоутворення, утворення й трансформування гетерофаз, закономірності перебігу яких мало вивчені.

Найвні відомості щодо стану і можливих напрямів удосконалення технологій створення оксидних РЗЕ-вмісних функціональних матеріалів, способів активації процесів; існуючі вимоги до їх стабільності й відтворюваності властивостей ініціювали проведення нашого дослідження.

Метою цієї роботи є фундаментальні дослідження кооперативних процесів, які протікають при одержанні оксидних РЗЕ-вмісних функціональних матеріалів на підготовчих стадіях з використанням нітратів елементів різної електронної структури, та знаходження можливих прийомів впливу на рідкофазні і твердофазні системи, основаних на термічній активації реагентів, з метою відтворення їх структурно-чутливих характеристик.

Постановка завдання

Для оцінки можливості керування вказаними процесами й одержання матеріалів із заданими властивостями із застосуванням комплексу фізико-хімічних методів потрібно:

а) вивчити хімічну взаємодію, фазові рівноваги у модельних водно-сольових системах $\text{LiNO}_3 - \text{Ln}(\text{NO}_3)_3 - \text{H}_2\text{O}$ ($\text{Ln} - \text{Y}, \text{La} - \text{Lu}$) в інтервалі 25 – 100°C;

б) побудувати політермічні діаграми розчинності систем. Визначити концентраційні й температурні межі кристалізації вихідних речовин і виявлених комплексних сполук;

в) з'ясувати оптимальні умови росту і провести синтез координаційних нітратів рідкісноземельних елементів і літію, вивчити їх властивості та підтвердити індивідуальність;

г) установити закономірності залежності числа, складу, властивостей координаційних нітратів, що утворюються у досліджуваних системах, від природи іону Ln^{3+} -комплексоутворювача, умов утворення.

Експериментальна частина

Для з'ясування характеру хімічної поведінки структурних компонентів і фазових рівноваг у досліджуваних водно-сольових системах – прекурсорах багатокомпонентних РЗЕ-вмісних функціональних матеріалів ізотермічно, в температурному діапазоні існування розчинів у повних концентраційних співвідношеннях використано метод розчинності і методика, описана в попередніх наших публікаціях [16, 17].

Хімічний аналіз рідких і твердих фаз проводили на вміст іонів Ln^{3+} й азоту. Кількість лантанюду визначали трилометрично за наявності ксиленового оранжевого в ацетатному буферному розчині, азот – методом відгонки і по сухому залишку. Уміст солі літію розраховували за різницею, виходячи із загального вмісту нітратів. Отримані результати для окремих складових аналізу перераховували на склад солей і потім наносили на діаграми розчинності.

Ідентифікацію подвійних солей, виявлених у системах, проводили за методом Скрейнемакерса, хімічним та кристалооптичним методами аналізу. Синтезовані сполуки досліджували також пікнометричним, мікрофотографічним, термографічним, ІЧ спектроскопічним, рентгенофазовим і рентгеноструктурним методами.

Результати та їх обговорення

Одержані експериментальні дані з вивчення систем узагальнені, зведені в табл. 1, 2 та використовуються для графічної інтерпретації результатів дослідження (рис. 2).

В інтервалі 25 – 100°C між структурними компонентами виявлені обмінні взаємодії з утворенням нових аніонних координаційних сполук лантанюдів. Вивчено їх кількість (чотири), склад, можливі види сполук, концентраційні межі кристалізації фаз, що співіснують у конкретних системах, характер їх розчинності, побудовані фазові діаграми розчинності. Концентраційним межах насичених розчинів, із яких виділяються координаційні нітрати Ln , відповідають склади нонваріантних точок відповідних ізотерм розчинності. Усі вони синтезовані у монокристалічному вигляді. Підтверджено їх індивідуальність та проведено системне вивчення низки їх властивостей.

У досліджених водно-сольових системах нітратів літію і рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи виявлені поля кристалізації:
– вихідних нітратів:

1) літій (кристалогідрату $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ до $t \sim 30^\circ\text{C}$, безводного LiNO_3 при $t > 30^\circ\text{C}$) і

2) лантанодів La – Sm (гексагідрату $\text{Ln}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ при $t < 68^\circ\text{C}$, при вищих температурах – кристалогідратні форми вказаних лантанодів не стійкі і перебувають у рідкому стані);

– виявлених вперше координаційних нітратів $\text{Li}_3[\text{Ln}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Ln – La – Nd, конгурентно ро-

зчинних у воді), що виділяються із розчинів при $t > 65^\circ\text{C}$ (вірогідно, що область існування такої ж сполуки у самарієвій системі в ізотермічному перерізі 100°C дуже вузька).

Для РЗЕ ітрієвої підгрупи характерне існування полів кристалізації тільки вихідних речовин з різною гідратною стійкістю; системи Y, Gd – Lu являються евтонічного типу.

Таблиця 1 – Умови утворення літєвих подвійних нітратів лантанодів церієвої підгрупи у системах $\text{LiNO}_3 - \text{Ln}(\text{NO}_3)_3 - \text{H}_2\text{O}$ (Ln – La – Sm) при 25 – 100 °C

t, °C	Системи / Точки ізотерм			Склад точок на фазовій діаграмі, мас. %				
				La	Ce	Pr	Nd	Sm
25	A ₁	Розчинність LiNO_3 , мас. %	47,66					
	B ₁ ^I	Фігуративна (евтонічна) точка	LiNO_3	31,92	31,09	35,84	35,45	31,94
			$\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$	31,86	32,03	26,65	28,07	30,07
	B ₁ ^{II}	Фігуративна точка	LiNO_3	19,54	20,49	24,13	28,28	
		$\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$	47,96	47,08	41,69	37,63		
	C ₁	Розчинність $\text{Ln}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, мас. %		58,92	59,05	59,01	58,89	59,22
50	A ₂	Розчинність LiNO_3 , мас. %	63,80					
	B ₂	Евтонічна точка	LiNO_3	23,29	22,87	21,93	21,48	24,90
			$\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$	53,61	53,89	54,28	54,35	46,96
C ₂	Розчинність $\text{Ln}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, мас. %		65,79	66,62	66,64	66,16	65,59	
100	A ₃	Розчинність LiNO_3 , мас. %	67,28					
	D ₁	Перехідна (евтонічна) точка	LiNO_3	27,11	26,84	24,09	24,03	17,56
			$\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$	53,35	54,35	54,66	54,68	67,31
	Сполука F ₁	Співвідношення компонентів		3:2:3	3:2:3	3:2:3	3:2:3	
			Характер розчинності		конгр.	конгр.	конгр.	конгр.
G	Евтонічна точка	LiNO_3	9,92	9,76	8,73	9,68		
		$\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$	71,03	71,45	72,20	72,51		

Таблиця 2 – Дані з вивчення фазових рівноваг у системах $\text{LiNO}_3 - \text{Ln}(\text{NO}_3)_3 - \text{H}_2\text{O}$ (Ln – Y, Gd – Lu) при 25, 50, 100 °C

t, °C	Системи / Точки ізотерм			Склад точок на фазовій діаграмі, мас. %								
				Y	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
25	A ₁	Розчинність LiNO_3 , мас. %	47,7									
	B ₁	Евтонічна точка	LiNO_3	31,4	32,7	31,8	31,9	31,3	31,4	25,9	19,2	18,8
			$\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$	30,6	30,5	32,5	33,5	34,4	34,5	41,4	51,6	53,2
C ₁	Розчинність $\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$ і його гідратність у твердій фазі, мас. %		59,2	59,5	60,2	62,4	65,2	66,1	68,2	70,1	71,7	
				6	5	5	5	5	5	5	4	4
50	A ₂	Розчинність LiNO_3 , мас. %	63,8									
	B ₂	Евтонічна точка	LiNO_3	31,2	38,1	33,6	34,5	33,8	32,3	21,6	22,4	22,6
			$\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$	40,7	37,3	38,4	39,5	43,3	45,2	53,7	56,5	56,9
C ₂	Розчинність $\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$ і його гідратність у твердій фазі, мас. %		63,9	65,7	66,4	67,7	69,0	70,4	73,0	75,2	76,3	
				6	5	5	5	5	5	5	4	4
100	A ₃	Розчинність LiNO_3 , мас. %	67,3									
	B ₃	Евтонічна точка	LiNO_3	16,8	15,9	16,2	16,3	16,2	16,5	16,2	15,3	15,0
			$\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$	64,5	67,9	68,3	68,9	68,5	67,0	67,5	68,9	69,0
C ₃	Розчинність $\text{Ln}(\text{NO}_3)_3$ і його гідратність у твердій фазі, мас. %					74,8	75,9	75,3	76,1	81,3	81,6	
						4	4	4	4	4	3	

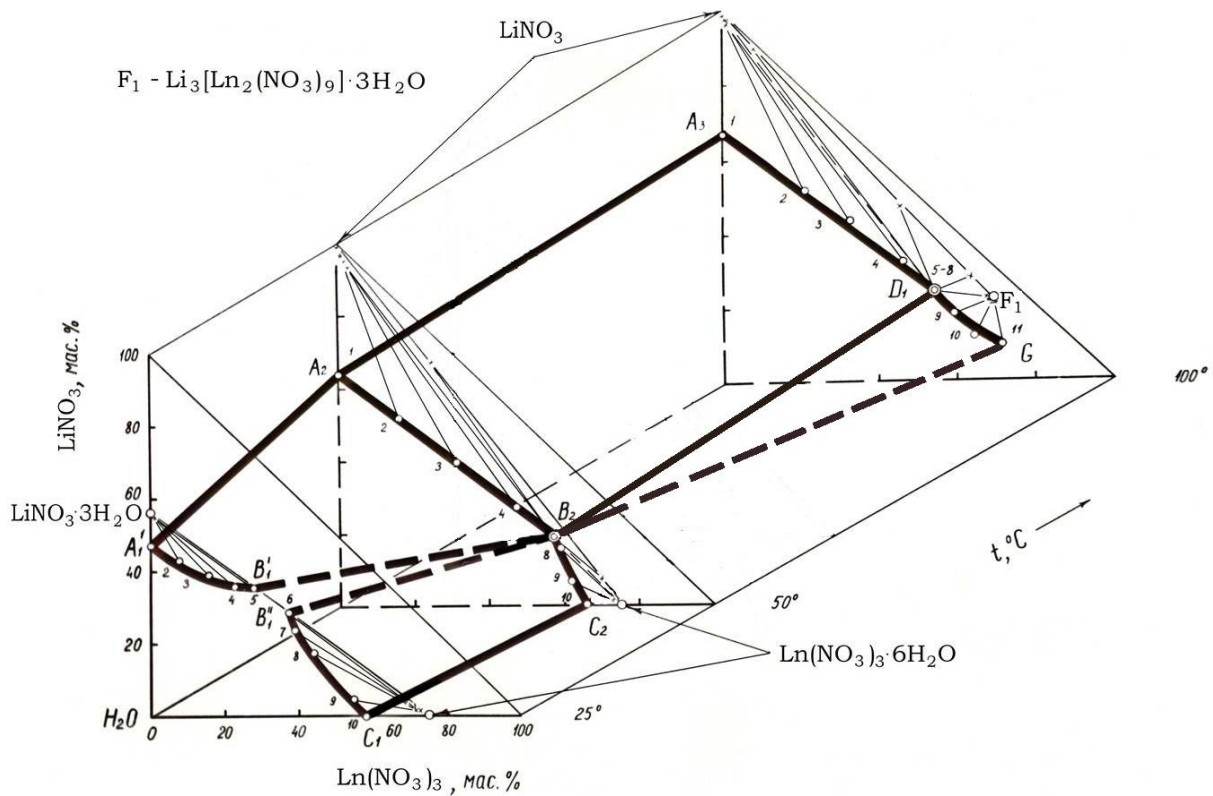


Рис. 2. Політерма розчинності системи $\text{LiNO}_3 - \text{Ln}(\text{NO}_3)_3 - \text{H}_2\text{O}$ ($\text{Ln} - \text{La} - \text{Nd}$)

Розрив $\text{B}_1^{\text{I}} - \text{B}_1^{\text{II}}$ у середній частині ізотерм розчинності (25°C) потрібних систем $\text{La} - \text{Sm}$ демонструє знаходження об'єктів дослідження у даній області концентраційних співвідношень компонентів у рідкому стані за рахунок виділення сумішшю гідратованих нітратів літію й лантанюду кристалізаційної води у кількості, достатній для розчинення «твердого залишку». Комплексне фізико-хімічне охарактеризування виявлених ізоструктурних літєвих координаційних нітратів РЗЕ церієвої підгрупи щодо умов їх утворення й існування, природи хімічного зв'язку, складу, будови [18], форми координаційних поліедрів Ln, типу координації ліганд, виявляємих характерних властивостей приведено в [17]. Авторами роботи з'ясовано рентгено-дифракційні характерні параметри новоутворюваних фаз для можливості їх ідентифікації та виявлення в ході перероблення (як приклад, табл. 3); характер і закономірності теплових перетворень сполук в температурному діапазоні $25 - 1000^\circ\text{C}$ для можливості з'ясування їхньої термостійкості й моделювання поведінки технологічних об'єктів в аналогічних умовах.

В атомно-кристалічній будові літєвих координаційних сполук (рис. 3) атоми Ln розподілені за двома індивідуальними позиціями на осях третього порядку. Ікосаедри навколо Ln1 і Ln2 побудовані неоднаково. Різниця полягає в розподілі укорочених ребер; наявністю у структурі трьох нееквівалентних наборів нітратогруп, що характеризуються певними особливостями зв'язків з атомами Ln та Li. Так нітратогрупа одного з атомів азоту (N1) «обслуговує» два незалежних комплексоутворювача, а її місткові атоми кисню пов'язують комплекси $[\text{Ln}(\text{NO}_3)_6]^{3-}$ в тривимірний каркас з формулою $[\text{Ln}_2(\text{NO}_3)_9]^{3-\infty\infty}$. Атоми Li

поміщені в більші канали та включають в свою координаційну сферу чотири атоми кисню. Їх координаційні багатогранники – характерні сплюснені тетраедри, кожен із яких утворений атомами кисню води й нітратогруп N2 і N3. Таким чином, в літєвих координаційних нітратах $\text{Li}_3[\text{Ln}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ атоми Li, здійснюючи додаткові зв'язки між рідкісноземельними комплексами, сприяють присутності міжмолекулярної води в структурі, а також обумовлюють деяке виявлене розходження в будові рідкісноземельних ікосаедрів, які, у свою чергу, виконують важливу структуроутворювальну функцію в просторовій побудові при формуванні набору характеристик цільових перовскітних продуктів на відповідних стадіях процесу синтезу.

Таблиця 3 – Рентгенографічні дані літєвого координаційного нітрату неодиму

$\text{Li}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$					
d, Å	I/I ₀ , %	d, Å	I/I ₀ , %	d, Å	I/I ₀ , %
8,36	30	3,90	40	2,135	49
7,64	77	3,56	26	2,111	43
6,68	13	3,32	19	2,013	19
6,00	38	3,22	47	1,979	19
5,75	79	2,978	34	1,944	28
5,42	98	2,772	19	1,931	26
5,26	74	2,617	28	1,855	15
4,76	51	2,545	43	1,778	15
4,64	100	2,385	21	1,726	28
4,35	43	2,328	17	1,708	34
4,19	47	2,305	23	–	–
3,94	51	2,226	19	–	–

Примітка: d, Å – міжплощинні відстані; I/I₀, % – відносні інтенсивності рефлексів

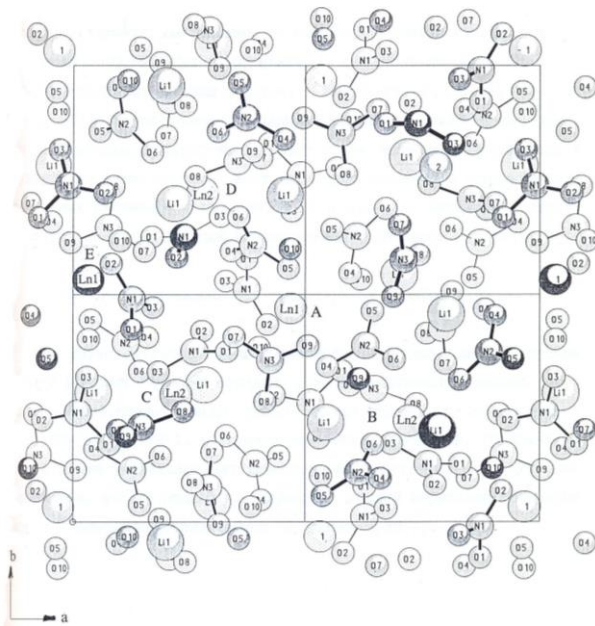


Рис. 3. Проекція структури $\text{Li}_3[\text{Ln}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ на площину ab , [18]

Одержані результати дають вагому підставу припускати, що процес розкладання кристалічних лужних рідкісноземельних нітратів у технологічних об'єктах при тепловій активації починається з розриву частини зв'язків лужний метал–окисген. Підтвердженням цьому факту є результати досліджень із вивчення поведінки вище приведених сполук в інтервалі 25–1000 °С термографічними засобами.

За допомогою дериватографа й розробленої установки для диференціально-термічного аналізу вивчена термічна стійкість представника ізоструктурного ряду літєвих координаційних нітратів лантанодів церієвої підгрупи – $\text{Li}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (рис. 4).

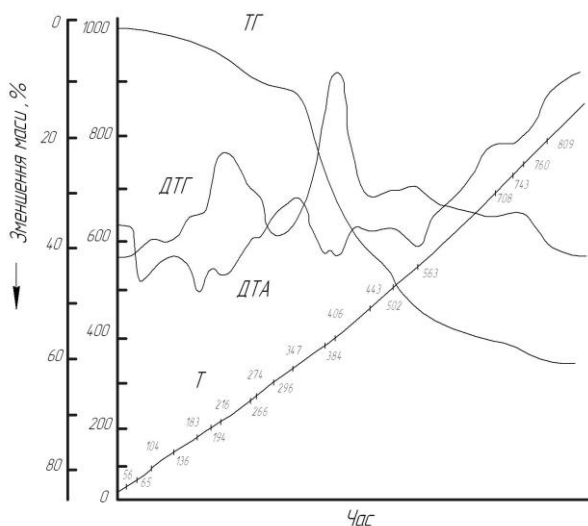


Рис. 4. Дериватограма $\text{Li}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.
Т – температурна крива; ДТА – диференціальна температурна крива; ТГ – термографіметрична крива; ДТГ – диференціальна термографіметрична крива

Дериватограма $\text{Li}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ складається з низки ендотермічних ефектів. Перші три

(65, 183, 216 °С) відповідають процесу зневоднення досліджуваного тригідрата. При температурі 65 °С відбувається часткове, а при 183 °С – його повне інконгруентне плавлення в кристалізаційній воді. Наступні термічні перетворення, включаючи завершення виділення азоту, відбуваються в розплаві. На кривій ТГ при 274–347 °С спостерігається інтервал стабілізації маси, якому відповідає склад розплаву безводного літєвого координаційного нітрату Nd . Це підтверджується хімічним аналізом. Такий характер поведінки системи пояснюється накладанням теплових ефектів дегідратації і плавлення $\text{Li}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9]$ через близькість їх значень температури та інерційності процесу обезводнення. Зниження маси продуктів розпаду вище 809 °С відповідає утворенню LiNdO_2 , невеликої кількості Li_2O і домішки Nd_2O_3 , що підтверджується рентгенографічно.

Отримані емпіричні дані про умови утворення й існування, атомно-кристалічну структуру, властивості, характер і стадійність теплових перетворень літєвих координаційних нітратів лантанодів відіграють важливу роль в оптимізації розробок технологій виготовлення нових багатофункціональних РЗЕ-вмісних матеріалів, які сприяють інноваційній діяльності в різних галузях; слугують для пояснення та прогнозування властивостей проміжних фаз і мають як самостійну наукову, так і прикладну цінність.

Особливе значення одержана система знань набуває при формуванні наноструктурованих перовскітоподібних сполук лантанодів і перехідних елементів, твердих розчинів на їх основі, (в тому числі титану, описаних в роботах [1–14], та інших), з метою з'ясування взаємозв'язку між способом приготування, варіативністю методу активації систем, методологією виготовлення і фазовим складом, параметрами решіток, величиною питомої поверхні, морфологією складових частинок, каталітичною і фотокаталітичною активністю зразків в реакціях розкладання води для цілей отримання водню, розкладання токсичних органічних речовин, неповного окиснення вуглеводів; при отриманні інших перовскітоподібних фаз шляхом реакцій іонного обміну, що може суттєво спростувати процедури синтезу цільових продуктів.

Висновки

Узагальнено важливі для практичного використання відомості про літєві координаційні нітрати рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи ізоструктурного ряду $\text{Li}_3[\text{Ln}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Ln – La – Nd) – прекурсори перспективних сучасних багатофункціональних матеріалів – щодо умов їх утворення й існування, природи хімічного зв'язку, складу, будови, форми координаційних поліедрів Ln , типу координації ліганд, виявляємих характерних властивостей. Одержані дані (як первинна інформація) є основою для виявлення, ідентифікації, контролю фазового стану об'єктів перероблення у підготовчих стадіях, вибору критеріїв сумісності складових при формуванні одношарових і шаруватих наноструктуро-

ваних оксидних систем лантанодів і перехідних елементів різного призначення зі структурою дефектного перовскіта, граната у вигляді порошків, товстих плівок, об'ємної кераміки; розроблення різних

комбінованих способів їх активації та встановлення технологічно-функціональних залежностей; керованого модифікування властивостей одержуваних цільових продуктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Stramare, S., Thangadurai, V. & Weppner, W. Lithium lanthanum titanates: a review. *Chem. Mater.* 15, 3974–3990 (2003).
2. Nakayama, M., Usui, T., Uchimoto, Y., Wakihara, M. & Yamamoto, M. Changes in electronic structure upon lithium insertion into the a-site deficient perovskite type oxides (Li,La)TiO₃. *J. Phys. Chem. B* 109, 4135–4143 (2005).
3. Hua, C., Fang, X., Wang, Z. & Chen, L. Lithium storage in perovskite lithium lanthanum titanate. *Electrochem. Commun.* 32, 5–8 (2013).
4. Kwon, W. et al. Enhanced Li⁺ conduction in perovskite Li_{3x}La_{2/3-x}Y_{1/3-2x}TiO₃ solid-electrolytes via microstructural engineering. *J. Mater. Chem. A* 5, 6257–6262 (2017).
5. Belous, A. et al. Peculiarities of Li_{0.5}La_{0.5}TiO₃ formation during the synthesis by solid-state reaction or precipitation from solutions. *Chem. Mater.* 16, 407–417 (2004).
6. Белоус А.Г. Некоторые тенденции развития функциональных материалов на основе сложных оксидных систем / А.Г. Белоус // Укр. хим. журн. – 2009. – Т. 75, № 7. – С. 3 – 14.
7. Гавриленко О.М. Літій-провідні матеріали на основі ніобатів і танталатів лантану: синтез, структура, властивості / О.М. Гавриленко // Укр. хим. журн. – 2004. – Т. 70, № 9. – С. 31 – 34.
8. Гавриленко О.М. Кристалохімічні особливості та властивості Li⁺, {Na⁺, K⁺}-заміщених ніобатів лантану і структурою дефектного перовскіта / О.М. Гавриленко, О.В. Пашкова, А.Г. Білоус // Укр. хим. журн. – 2005. – Т. 71, № 8. – С. 73 – 77.
8. Ramzy A. Tailor-Made Development of Fast Li Ion Conducting Garnet-Like Solid Electrolytes / A. Ramzy, V. Thangadurai // *A. Chem. Soc.* – 2010. – Vol. 2., No. 2. – P. 385 – 390.
9. Белоус А.Г. Сложные оксиды металлов для сверхвысокочастотных и высокопроницаемых диэлектриков / А.Г. Белоус // Укр. хим. журн. – 2008. – Т. 74, № 1. – С. 3 – 21.
10. Lu Zhang, Xiaohua Zhang, Guiying Tian et al. Lithium lanthanum titanate perovskite as an anode for lithium ion batteries. *Nature communications.* 11, 3490, 1-8. (2020) <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17233-1>
11. Nakayama, M., Usui, T., Uchimoto, Y., Wakihara, M. & Yamamoto, M. Changes in electronic structure upon lithium insertion into the a-site deficient perovskite type oxides (Li, La)TiO₃. *J. Phys. Chem. B* 109, 4135–4143 (2005).
12. Кобилянська С.Д., Ліньова Б.О., Солопан С.О. та ін. Синтез товстих плівок літійпровідних матеріалів зі структурами дефектного перовскіта і NASICON та їх електрофізичні властивості // Укр. хим. журн. – 2015. – Т. 81, № 7. – С. 25-30.
13. Jena H. Studies on the ionic transport and structural investigations of La_{0.5}Li_{0.5}TiO₃ perovskite synthesized by wet chemical methods and the effect of Ce, Zr substitution at Ti site / Hrudananda Jena, K.V. Govindan Kutty // *J. Mater. Sci.* – 2005. – Vol. 40. – P. 4737 – 4748.
14. Дрючко О.Г. Фізико-хімічні аспекти використання РЗЕ-вмісних нітратних систем при синтезі конструкційної і функціональної кераміки / [О.Г. Дрючко, Д.О. Стороженко, Н.В. Бунякіна та ін.] // Зб. наукових праць ВАТ «УкрНДІВ імені А.С. Бережного». – Х.: Каравела, 2010. – № 110. – С. 58 – 63.
15. Дрючко О. Г. Хімічні перетворення і властивості проміжних фаз у багатокомпонентних РЗЕ-вмісних системах нітратних прекурсорів у ході оброблення з тепловою активацією / О. Г. Дрючко, Д. О. Стороженко, Н. В. Бунякіна І. О. Іваницька // Вісник НТУ «ХПІ». – 2017. – № 48 (1269). – С. 34–46.
16. Дрючко О.Г. Фізико-хімічне охарактеризування координаційних нітратів РЗЕ і лужних металів – прекурсорів оксидних поліфункціональних матеріалів / О. Г. Дрючко, Д. О. Стороженко, Н. В. Бунякіна та ін. // Вісник НТУ «ХПІ». – 2018. – № 39 (1315). – С. 3–13. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2018.39.01>
17. Вигдорчик, А. Г. Синтез и рентгеноструктурное исследование литиевых редкоземельных нитратов Li₃[Ln₂(NO₃)₉]·3H₂O, где Ln = La, Nd / А. Г. Вигдорчик, Ю. А. Малиновский, А. Г. Дрючко и др. // Кристаллография. – 1991. – Т. 36, В. 6. – С. 1395–1402.

Received (Надійшла) 24.12.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.02.2023

Transformations in ree- and lithium-containing systems of nitrate precursors in the processes of obtaining oxide polyfunctional materials

O. Dryuchko, V. Solovjev, O. Schefer, N. Bunyakina, N. Borozdin, V. Galai, O. Kulchyi

Abstract. Information important for practical use on lithium coordination nitrates of rare-earth elements of the cerium subgroup of the isostructural series Li₃[Ln₂(NO₃)₉]·3H₂O (Ln – La–Nd) – precursors of promising modern multifunctional materials – on the conditions of their formation and existence, composition, structure is summarized. , shapes of Ln coordination polyhedra, type of ligand coordination, characteristic properties. The data obtained (as primary information) are the basis for identifying, identifying, monitoring the phase state of processing objects in the preparatory stages, selecting criteria for the compatibility of components in the formation of single-layer and layered nanostructured oxide systems of lanthanides and transition elements for various purposes with the structure of defective perovskite, garnet in the form of powders, thick films, bulk ceramics; development of various combined methods of their activation and establishment of technological and functional dependencies; controlled modification of the properties of the resulting target products; optimization of regulations for the synthesis of lithium-conductive systems as electrodes of rechargeable batteries, electrolytic membranes and sensors, elements and instrument structures of modern telecommunication systems.

Keywords: lithium coordination nitrates of lanthanides, conditions of formation, crystal structure of compounds, characteristic properties, modification of the characteristics of titanate systems, film lithium-conducting solid electrolytes.

R. Baranenko¹, D. Tyshchenko², T. Franchuk², H. Sokol³

¹ Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

² Kyiv National University of Trade and Economics, Kiev, Ukraine

³ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

INFORMATION SYSTEM FOR QUALITY ASSURANCE OF EDUCATION

Abstract. The article analyzes the problem of developing and implementing an information system for quality assurance of higher education. The purpose of the article is to research modern methodological, technical and software tools used in the process of developing and implementing an information system for quality assurance of higher education. The peculiarities of the development of the announced information system were analyzed, on the basis of which the requirements for the design of the information system were determined, the possibilities of modification and development of the information system for ensuring the quality of education were investigated, and ways of its improvement were proposed.

Keywords: management information system, information system, education, software.

Introduction

For modern society, acquiring new knowledge, mastering new technologies, methods of managing social and scientific processes is of great importance. Any type of activity must go through certain stages that are directly related to the collection of information, its analysis, the selection of priority tasks, the finding of optimal options for solving these tasks, the formation of approaches to the realization of the intended goals. First of all, technologies made it possible to receive information in any quantity, and not be limited to a given volume. The ability to use the network has become indispensable. Students also had the opportunity to show their creative abilities thanks to various presentations and other things. Separately, it is worth talking about the fact that the new information technologies of education have allowed the emergence of completely new projects that help self-learning, distance learning, and this, in turn, allows maintaining the connection between teachers and students.

The object of research is an information system for collecting quality indicators of educational services of a higher education institution. The purpose of the work is to investigate the education quality system of the institution of higher education and the possibility of its improvement by developing an information system for collecting quality indicators of the work of the educational and pedagogical staff of the departments.

Analysis of recent research and publications.

The results of the conducted research were reported and published in the materials of numerous scientific conferences of professors, teachers, researchers, post-graduate students and students of the institution of higher education. Bublyk M., Karpiak A., Rybytska O. believe that one of the main directions of informatization is the construction of an informational educational space, then in this context such problems arise as: lack of a single software standard, lack of technical personnel for the maintenance of technical devices [1]. Chukhrai N., Shcherbata T. analyze the

cooperation of modern IT enterprises with leading domestic and foreign universities [2]. According to many researchers, in particular, Alyoshin S., Borodina O., Hafiiak A., Nosach O. many of the information technologies within the walls of educational institutions are not fully equipped with the package of programs necessary for training [3, 4]. Melnyk, M., Korcell-Olejniczak, E., Chorna, N., Popadynets, N. argue that the actual problems are: problems related to the conservatism of electronic publications and the use of outdated ideas about software architecture in their design [5–8].

Main part

In a world where things that are easy to teach and test are also easy to digitize and automate, it is our imagination, our awareness and our sense of responsibility that will allow us to use the opportunities of the XXI century to shape the world for the better. Higher education institutions need to help future professionals think for themselves and engage with others with compassion in work and citizenship. They will need to help higher education graduates develop a strong sense of professional competence.

How these fundamental changes will affect us depends on how we collectively and systemically respond to them. Education is a very important area of any country. It is thanks to education that success in further development is ensured. Given the fact that in this area, the trends of the modern century should be taken into account, information technologies of education are particularly popular. Educational information technologies can be of several types. Everyone is necessary for full-fledged training, as well as for this process to be comfortable and pleasant for all parties. First of all, information technology has helped teachers a lot. This is a great way to get all the information you need, as well as competently compile relevant and modern lessons. Teaching systems are constantly changing, and a huge number of discoveries are made, but with the help of the Internet it is easy to

always be up to date and make your lessons as useful as possible for modern people. It is also impossible not to emphasize the form of teaching itself.

Information technology in education allows you to find not only texts, but also videos, slides, and much more on this topic. Now the training is interesting and enjoyable, because it is not only in the form of stories, but also with the help of computers and technical means, as well as projectors, information is presented in the most convenient format for students. Many even gladly began to receive higher education at various educational institutions, although it used to be a great difficulty.

Carrying out tasks, projects and making sessions remotely is a great opportunity to replace the classical form of education. Teachers can now teach with the software and also have opportunities to learn languages with them or acquire a new profession that is not too difficult. New trends and strategies for integrating ICT into daily educational practice are a necessary condition for the modernization of the education system. Digital learning materials are different from traditional ones and have the ability to manage them. In the process of work, a number of tasks are defined: analyze the current quality management systems of higher education; investigate the processes of informatization through the prism of the development of the educational space; evaluate the negative consequences of the analyzed system, indicate the possibilities of their elimination; develop, design and implement an information system.

Today, university students and teachers are representatives of that social environment, in which there is a huge flow of information that is constantly updated, and due to limited opportunities, a person cannot take full advantage of this "huge flow". Under the current circumstances, humanity has come to such a process as "informatization".

The main most popular LMS systems (Blackboard, Moodle and Sakai) provide a concentration of learning materials and courses, and also cover course management, registration, course planning, discussion forums, blog sites, assessments. The main features of the LMS are password-controlled access to selected courses. The LMS tracks which materials a student has access to and how much time they spend on them.

Here, learning activity analysis is performed to collect data available to the LMS about student actions. Enrollment accounting systems in an LMS contain basic student information such as registration details, course selection, course outline, qualification objectives, study time and tracking information. In particular, the practice of private, elite, individual education is becoming more and more widespread, which inevitably causes the role of traditional public education to decline. Forums/webinars, e-mail, chats are also used to include recipients in the publication of materials or can be mechanisms for uploading via blogs or wikis, links to other web resources, such as library resources.

Also, it is possible to obtain information and sum up statistics through mass surveys with the provided ERP variants of system indicators of department activity, which greatly complicates the task due to the

preparatory stage and time for its implementation. As a result of the implementation of the developed site, we will get the opportunity to conduct an internal audit without much time expenditure and a visual display of the results of the activities of both individual units and the institution of higher education as a whole.

The following software was chosen to implement the above solution. Namely, CMS Joomla 1.5.25 content management system; Denver 3 software package, which includes: PHP 5.3; Apache 2; MySQL 5.1; phpMyAdmin; MySQL. At the same time, the dominant view remains that learning and social networks are incompatible. But experience shows that social media expand learning opportunities outside the educational institution, stimulate the joint work of future specialists, their awareness and communication.

During the implementation of the assigned task, the requirements for the designed and developed information system were taken into account, looks as shown in Fig. 1.

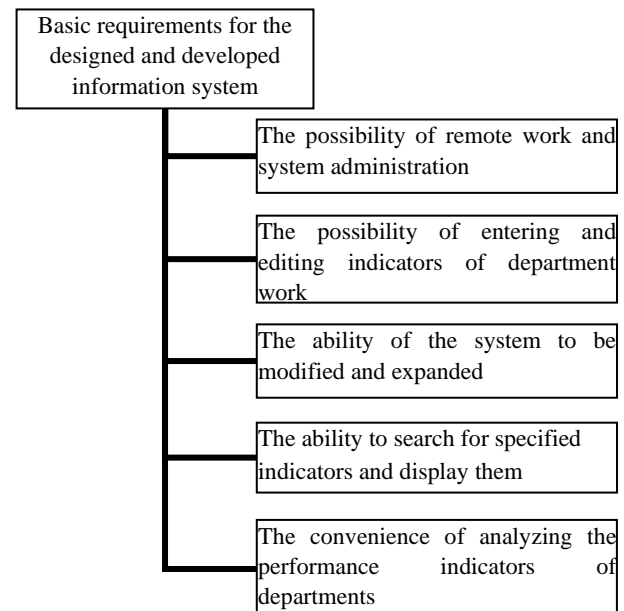


Fig. 1. Requirements for the designed and developed information system

A number of steps should be taken to develop interactive learning, namely: recognize the value of education in a non-traditional, informal or everyday environment, encouraging students' aspirations for self-realization through the use of mobile learning tools; provide geographically dispersed needy with mobile technologies for sharing knowledge and experience; together with educational institutions, create administrative and legal norms for mobile learning; train teachers, encourage teachers who are constantly learning using various technical and software tools; work with stakeholders to provide the opportunity to reduce the cost of mobile Internet access for mobile learning.

The learning platform analyzes resource metadata and their preferences to deliver the appropriate type of resource for a specific user. This type of accessibility is useful for students with special needs. Since the most

important characteristic of an innovative educational platform is the support for the functioning of various devices and learning environments for teachers and future specialists, accessibility issues should be resolved based on the characteristics of the educational platform. Another factor in the diversification of educational platforms was changes in means of communication and information and computer infrastructures.

Conclusions

The information system will significantly reduce the time spent on obtaining quality indicators of the institution of higher education, because it has the possibility of remote access, and will also ensure their visibility. During pre-diploma practice, this system was tested and showed high performance and expected results.

The considered materials correspond to the most important directions of development of new information and communication technologies in various sectors of education. The study of various opportunities for obtaining education in the digital age shows how the forms of education are changing and what new resources are needed for this (educational platforms, mobile learning and cloud technologies in education, social media). In this work, the problem of informatization of educational services is analyzed, which increases the efficiency of activities and the quality of human preparation for a full-fledged life in the information society, and the necessity of introducing

information systems into the process of managing the activities of departments, faculties, and the institution of higher education as a whole is proven.

The work examines the ERP system of educational services and identifies ways to improve it, namely, the development of an information system for monitoring the quality of educational services, which contains the components of ERP systems and quantitative system indicators of the work of all departments of a higher education institution.

An information system for monitoring the quality of educational services has been developed: a system model has been developed; algorithms of system operation are developed, the implementation platform is selected and the data scheme of the system is developed; a flexible and intuitive user interface is developed.

On the basis of the above, it can be concluded that the project of the ERP information management system of the educational services system has been developed in this work, which will provide clear and long-term monitoring of the performance indicators of the departments, as well as help in determining the main tasks and directions of work and development of educational activities.

The developed system has a very convenient construction and, if necessary, can be supplemented and modified. The system provides the necessary conditions and work results and is completely ready for implementation.

REFERENCES

1. Bublik M.I., Karpiak A.O., Rybyska O.M. The perspectives of IT industry development in Ukraine on the basis of data analysis of the world economic forum. Innovative management: theoretical, methodical, anapplied grounds/ Pražský Institut zvyšování kvalifikace Prague institute for Qualification Enhancement. 2018. 115 -128.
2. Chukhrai, N. I., & Shcherbata, T. S. Cooperation between IT development enterprises and universities. Marketing And Management Of Innovations. (3). 2016. 161-169.
3. Hafiak A.M., Borodina O.O., Alyoshin S.P., Nosach O.B. The Information Society and Informatization Development Problems of Economy. International Journal of Engineering & Technology. 7. (4.8). 2018. 364 – 369.
4. Hafiak, A. Problems of professional competence formation of future specialists on information and communication technologies in universities. Modern scientific researches. Series: Education and pedagogy. Issue 10. Part 2. Yolnat PE, Minsk, Belarus. 2019. 15-18.
5. Zikov, I.S., Kuchuk, N.H. and Shmatkov S.I. (2018), “Synthesis of architecture of the computer transaction management system e-learning”, Advanced Information Systems, Vol. 2, No. 3, pp. 60-66, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>
6. Semenov, S., Weilin, C., Zhang, L., & Bulba, S. (2021). Automated penetration testing method using deep machine learning technology. Advanced Information Systems, 5(3), 119–127. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.16>
7. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. Сучасні інформаційні системи. 2018. Т. 2, № 2. С. 117–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>.
8. Melnyk, M., Korcelli-Olejniczak, E., Chorna, N., & Popadynets, N. Development of Regional IT clusters in Ukraine: institutional and investment dimensions. Economic Annals-XXI, (173). 2018. 19-25.

Received (Надійшла) 24.12.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.02.2023

Інформаційна система забезпечення якості освіти

Р. Бараненко, Д. Тищенко, Т. Франчук, Г. Сокол

Анотація. У статті проаналізовано проблему розробки та впровадження інформаційної системи забезпечення якості вищої освіти. Метою статті є дослідження сучасних методичних, технічних та програмних засобів, що використовують у процесі розробки та впровадження інформаційної системи забезпечення якості вищої освіти. Проаналізовано особливості розробки анонсованої інформаційної системи, на основі яких визначено вимоги до проектування інформаційної системи, досліджено можливості модифікації та розвитку інформаційної системи забезпечення якості освіти та запропоновано шляхи її вдосконалення.

Ключові слова: інформаційна система управління, інформаційні технології, освіта, програмне забезпечення.

С. Я. Бовчалюк, О. М. Піскаръов, С. С. Радченко, Д. О. Слабухо

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ КЕРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ НА БАЗІ ПЛІС

Анотація. Актуальність. На теперішній час використання керуючих пристроїв і структур з паралельною архітектурою для створення систем керування відповідальними процесами не є рідкісним явищем. У той же час для створення систем керування звичайними промисловими об'єктами і процесами вони практично не застосовуються. Таким чином удосконалення керуючих пристроїв з паралельною архітектурою для покращення їх характеристик, що дозволять більш широко застосовувати їх при створенні систем керування звичайними (промисловими, або навіть побутовими) об'єктами, є актуальною задачею. **Метою даної роботи** є формування вимог і напрямків удосконалення керуючих структур з паралельною архітектурою, для створення сучасних ПЛК ПД на базі ПЛІС, з розширеними функціональними можливостями. **Предметом дослідження** є напрямки розвитку керуючих пристроїв паралельної дії на базі ПЛІС. **В результаті** проведених авторами досліджень визначено недоліки керуючих пристроїв з паралельною архітектурою, що стримують їх широке застосування для побудови систем керування промисловими об'єктами. Визначено два основні напрямки розвитку і вдосконалення ПЛК ПД на базі ПЛІС. **Висновок.** Визначено два основні напрямки розвитку і вдосконалення ПЛК ПД на базі ПЛІС, що полягають у наступному: вдосконалення внутрішньої структури ПЛІС-контролера ПД для реалізації внутрішніх програмованих користувачем таймерів і лічильників; побудова і введення до структури ПЛІС-контролера ПД внутрішнього спецпроцесора у СЗК, для реалізації арифметичних операцій, що виконуються за один такт дискретного автоматного часу.

Ключові слова: програмований логічний контролер паралельної дії, ПЛІС-контролер, система залишкових класів, технологічне візуальне програмування.

Вступ

В наукових публікаціях останніх років неодноразово було описано реалізацію систем керування з паралельною архітектурою [1-4]. Якщо провести аналіз цих публікацій, можна визначити декілька основних тенденцій і напрямків розвитку керуючих пристроїв подібних систем, що отримали загально-вживану назву – паралельні програмовані логічні контролери (ППЛК), або у сучасній інтерпретації – програмовані логічні контролери паралельної дії (ПЛК ПД):

- розвиток і вдосконалення внутрішньої організації ПЛК ПД [1-4], що призводить до покращення безпекових можливостей керуючих систем, що побудовані на їх базі або розширює можливості інструментів логічної обробки вхідних сигналів [5, 6], вводить можливості реалізації функцій нечіткого логічного висновку [7, 8];

- реалізація ПЛК ПД на більш сучасній елементній базі – від побудови системи на дискретних ІМС малого ступеня інтеграції [3, 9], до паралельних структур на ПЛІС [10, 11];

- вдосконалення мови і технології програмування ПЛК ПД – від написання програми на паперовому носії з подальшим ручним програмуванням ІМС ПЗП, до автоматизованої технології програмування TVP (Technological Visual Programming) різних версій.

Якщо спробувати узагальнити напрямки застосування керуючих структур з паралельною архітектурою, то явно відслідковується їх орієнтація на об'єкти критичного застосування (залізничний транспорт, метрополітен, атомна енергетика), хоча первинно ППЛК типів ПЛ-1, БЛ1-8, БЛ2-1 реалізовували алгоритми керування класичним промисловим обладнанням (а саме – для виготовлення статорів

електродвигунів).

У той же час ПЛК ПД, як було показано в [2-4], мають низку переваг, серед яких слід згадати дві найважливіші. Першою перевагою є відсутність залежності кількості контрольованих входів і керованих виходів від швидкодії контролера. Другою перевагою є можливість реалізації TVP-технології для автоматизованого створення керуючих програм неспеціалістом в області програмування і на спрощених мовах. Така технологія дозволяє значно зменшити кількість помилок у програмному коді, пришвидшити процес його формування, уникнути непорозумінь між спеціалістом з технологічного процесу (технологом) і спеціалістом з програмування (програмістом) [12-14]. Таким чином удосконалення керуючих пристроїв з паралельною архітектурою для покращення їх характеристик, що дозволять більш широко застосовувати їх при створенні систем керування звичайними (промисловими, або навіть побутовими) об'єктами і процесами, є дуже актуальною задачею.

Метою цієї роботи є формування вимог і напрямків удосконалення керуючих структур з паралельною архітектурою, для створення сучасних ПЛК ПД на базі ПЛІС, з розширеними функціональними можливостями.

Основна частина

На даний час існує дві «класичних» структури керуючих пристроїв з паралельною архітектурою.

Першу з них показано на рис. 1. Це приклад ППЛК, що був реалізований на дискретних ІМС малого ступеня інтеграції і достатньо активно використовувався для керування промисловим обладнанням.

Основу універсального паралельного ПЛК складають блоки пам'яті (БП), причому у БП(А) за-

писується матриця A очікуваних станів керуемого об'єкту, у БП(В) – матриця B очікуваних станів зовнішнього середовища, у БП(С) – матриця C команд керування, а у БП(Д) – матриця D адрес переходів. Також до складу ППЛК входять генератор Γ , лічильники адреси ЛчА1 і ЛчА2, схеми порівняння Ср1 і Ср2, вихідний регістр Рг і вузол логічного керування ВЛК. Детально принцип дії показаної керуючої структури наведено в [3, 5].

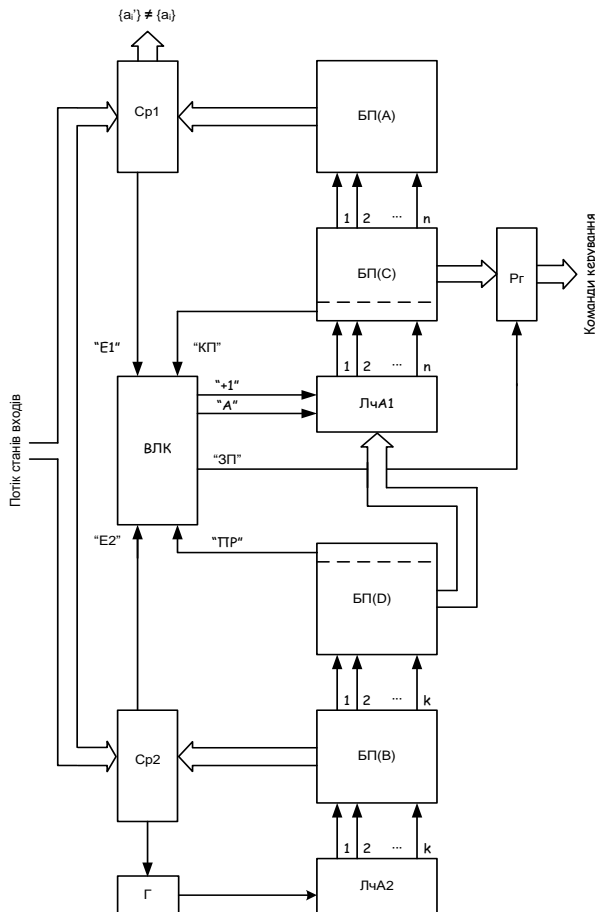


Рис. 1. Структура універсального паралельного ПЛК

Структуру другого типу показано на рис. 2. Від попередньої вона відрізняється покращеними надійнісними характеристиками і розширеним функціоналом логічного аналізу вхідних сигналів. Але основними особливостями є реалізація ПЛК ПД такого типу на базі ІМС великого ступеня інтеграції – ПЛІС і реалізація процесу складання програмного забезпечення із застосуванням комп'ютера і технологічного візуального програмування (TVР-технології). ПЛК ПД такого типу отримали назву ПЛІС-контролери паралельної дії.

Керуючий автомат ПЛІС-контролера ПД складається з наступних елементів: блоку індикації – БІ; схеми порівняння – СП; блоку вибору операцій – БВО; блоку логічного керування – БЛК; лічильника адреси – ЛА; вихідного регістру – ВР; а також блоків пам'яті станів, команд, переходів і заборонених комбінацій – БПС, БПК, БПП, БПЗК. Детально з принципом дії показаної керуючої структури можна ознайомитись, наприклад, в [2, 4].

Не дивлячись на значні відмінності в умовних позначеннях і зовнішньому вигляді структур, що показано на рис. 1 і 2, призначення основних блоків і принципи їх дії в основному збігаються. Відзначимо наступні пари визначальних блоків обох структур з аналогічними функціями: БП(А) – БПС; БП(С) – БПК; ВЛК – БЛК; БП(В)+БП(Д) – БПП. При цьому допоміжні блоки і елементи структур (лічильники, регістри) так само фактично виконують однакові функції.

Додатковий функціонал ПЛІС-контролера ПД формують блоки БВО і СП, що сумісно виконують функції блоків Ср1 і Ср2, але з розширеними можливостями (формування сигналу еквівалентності не тільки за логічною функцією «І», але і «АБО»). Також у структурі на рис. 2 присутній блок БПЗК – блок пам'яті заборонених комбінацій, за рахунок якого вдалось покращити надійнісні характеристики керуючих систем. Також слід згадати перспективні структури, що отримали назву автомата паралельної дії із нечіткою логікою (АПДН) [8, 15, 16]. Дослідження показали, що нечітка логіка може бути ефективним інструментом для керування енергетичним обладнанням, а також дозволить реалізовувати автомати паралельної дії для керування таким обладнанням за один такт дискретного автоматного часу. Але зазначимо, що АПДН – це структура для рішення специфічних задач, орієнтованих на енергетику.

Принциповою особливістю розглянутих структур є керування процесом обробки програми потоком вхідних станів, тобто потоком, який формують в асинхронній послідовності інтервалів дискретного автоматного часу «дозволені» комбінації фактичних станів керованого об'єкта і зовнішнього середовища. Для показаних структур зовсім нехарактерна така проблема всіх без виключення класичних мікропроцесорних контролерів послідовної дії, як «зависання», що позитивно відображується на надійнісних характеристиках керуючих систем. Ще одна важлива характеристика керуючих пристроїв з паралельною архітектурою (у порівнянні з послідовними ПЛК) – це можливість паралельного обслуговування практично необмеженої кількості контрольованих входів і керованих виходів за один такт дискретного автоматного часу [3, 4].

Саме ці особливості, у поєднанні з можливістю створення керуючих програм неспеціалістом в області програмування і на спрощених мовах, дозволяють розглядати ПЛК ПД як дуже перспективний клас керуючих пристроїв. Але вони мають низку дуже прикрих недоліків, що сильно зменшують привабливість таких пристроїв для кінцевого користувача.

У контексті поточного аналізу слід згадати дві дуже важливі відмінності класичних ПЛК від ПЛК ПД. Першою відмінністю є наявність в ПЛК програмованих користувачем таймерів і лічильників. Друга відмінність – можливість ПЛК виконувати арифметичні операції. Обидві ці функції в ПЛК ПД відсутні, їх реалізація не передбачена розглянутими вище структурами. Таким чином сфера застосування ПЛК ПД значно звужується, або ці функції мають виконувати зовнішні пристрої, що є дуже неефективним рішенням.

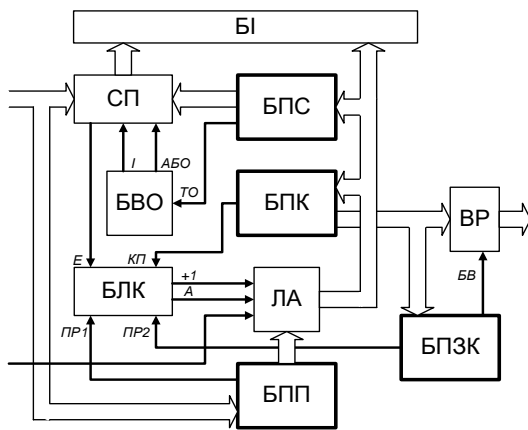


Рис. 2 Структура ПЛІС-контролера паралельної дії

Підходи до реалізації вказаних функцій на базі ПЛК ПД можуть бути різними, але у будь-якому випадку вони мають принципові відмінності. Так реалізація таймерів і лічильників (у найпростішому варіанті) вимагає додавання спеціалізованих блоків до структури ПЛК і відповідної підтримки з боку TVP-технології. У той же час реалізація арифметичних функцій не має простої реалізації внесенням зміни у структуру, або додаванням деяких блоків. Справа у тому, що ПЛК ПД, якраз і відрізняється від класичних ПЛК виконанням операцій за один такт дискретного автоматного часу (фізично тактів може бути більше через особливості структурної організації і функціонування кристалу ПЛІС). В той же час арифметичні операції передбачають послідовний принцип свого виконання. Це пов'язано, зокрема, з тим, що операції додавання) з наявністю переносів з молодшого розряду у старший. Це принципове протиріччя розв'язати реорганізацією структури ПЛК ПД неможливо.

Одним з можливих підходів подолання цього протиріччя є використання системи залишкових класів (СЗК), або числової системи залишків (ЧСЗ) англ. Residue Number System [17, 18]. Певні спроби інтеграції, або щонайменше, обґрунтування застосування СЗК для ПЛК ПД показано в [19]. Але, на жаль, до реальних інженерних рішень і реалізації подібного підходу на базі ПЛК, справа так і не дійшла. На рис. 3 показано узагальнену спрощену структуру спеціального процесора (СП) у якому обробка усіх розрядів (залишків) виконується паралельно у часі [19]. Застосування СЗК дозволяє досягти високих результатів у галузі створення сучасних швидкодіючих та високовідмовостійких спецобчислювачів та спеціалізованих процесорів обробки цифрової інформації [20, 21]. При цьому операційний пристрій СП в СЗК принципово може бути виконано наступними способами: у суматорному варіанті (на базі малорозрядних двійкових суматорів); з використанням кільцевих регістрів зсуву; використовуючи прямий логічний метод; в табличному (або матричному) варіанті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бовчалюк С. Я. Развитие архитектуры ПЛК параллельного действия: от абстрактной модели параллельного автомата, до инженерной реализации безопасного ПЛІС-контролера / С. Я. Бовчалюк, И. А. Фурман, М. Л. Малиновский // Энергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. 2016. – №. 2 (5). – С. 62-66.
2. Бовчалюк С. Я. Новая информационная технология логического управления в энергетике и на транспорте / С. Я. Бовчалюк // Системи управління, навігації та зв'язку. –2007. – Вип. 3 – С. 47-51.

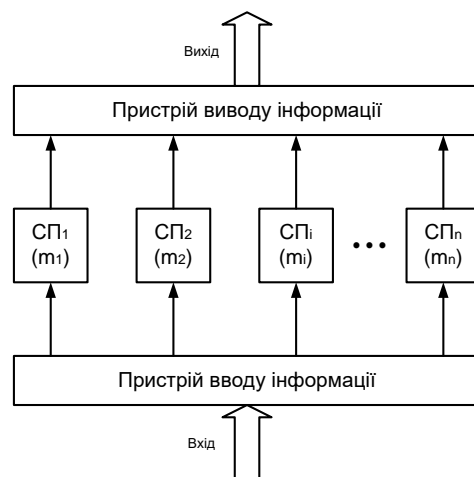


Рис. 3. Структура спеціального процесора СЗК

У [20, 21] показано, що виконання арифметичних операцій табличними методами (за допомогою ПЗП), у СП найбільш ефективно реалізується в СЗК. Основні переваги матричного (табличного) варіанта побудови СП в СЗК полягають у наступному:

- висока конструктивна надійність матричних схем в інтегральному виконанні;
- простота побудови матричних схем і дешифраторів, що мають кількість виходів, рівну величині підстави СЗК;
- висока швидкодія: результат операції може бути отриманий у момент надходження вхідних операндів, тобто. в один такт.

Також показано, що ефективним методом підвищення надійності та продуктивності СП є використання при реалізації арифметичних операцій матричних схем на основі ПЗП, ПЛМ, а також ПЛІС. Це твердження також є адекватним і для реалізації внутрішньої структури ПЛК ПД. Отже розглянутий підхід реалізації СП можна розглядати, як перспективний для реалізації арифметичних функцій ПЛК ПД.

Висновки

В результаті проведених авторами досліджень визначено недоліки керуючих пристроїв з паралельною архітектурою, що стримують їх широке застосування для побудови систем керування промисловими об'єктами.

Визначено два основні напрямки розвитку і вдосконалення ПЛК ПД на базі ПЛІС, що полягають у наступному:

- вдосконалення внутрішньої структури ПЛІС-контролера ПД для реалізації внутрішніх програмованих користувачем таймерів і лічильників;
- побудова і введення до структури ПЛІС-контролера ПД внутрішнього спеціального процесора у СЗК, для реалізації арифметичних операцій, що виконуються за один такт дискретного автоматного часу.

3. Фурман И. А. Научно-технические основы создания и промышленного применения параллельных логических контроллеров на программируемых БИС с матричной структурой : дис. ... докт. техн. наук: 05.13.05 / Фурман Илья Александрович. – К., 1989. – 197 с.
4. Бовчалюк С. Я. Модели, методы и средства информационной технологии параллельного логического управления объектами железнодорожной автоматики: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Бовчалюк Станіслав Ярославович. – Харьков, 2008. – 203 с.
5. Бовчалюк С. Я. Совершенствование математической модели и архитектуры логических управляющих автоматов параллельного действия / С. Я. Бовчалюк, И. А. Фурман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №3(59). – С. 72–76.
6. Бовчалюк С. Я. Вдосконалення алгоритму функціонування програмованого логічного контролера паралельної дії / С. Я. Бовчалюк, І. О. Фурман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – №2 (64). – С. 38–42.
7. Бовчалюк С. Я. Безпечний ПЛІС-контролер паралельної дії, як інтелектуальне ядро Smart Grid / С. Я. Бовчалюк, С. О. Тимчук, І. О. Фурман [та ін.] // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, вип. 187. – Харків, 2017. – С. 51–53.
8. Stanislav Bovchaliuk. The Architecture of Fuzzy Logic Automat of Parallel Action for the Intelligent Smart Grid Networks / S. Bovchaliuk, S. Tymchuk, S. Shendryk, V. Shendryk // New Technologies, Development and Application III. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 128. Springer, – 2020. – P. 462–468.
9. Фурман И. А. Перспективы развития структуры и технологии применения параллельных логических контроллеров / И. А. Фурман // Электротехника. – 1990. - №4. – С. 98–100.
10. Бовчалюк С. Я. HDL-модель програмованого логічного керуючого автомата паралельної дії / С. Я. Бовчалюк, І. О. Фурман // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – №6 (25). – С. 202–205.
11. Бовчалюк С. Я. Технічна реалізація промислового зразка ПЛІС-контролера паралельної дії / С. Я. Бовчалюк, І. А. Фурман, М. С. Деренко [та ін.] // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, вип. 87. – Харків, 2009. – С. 126–127.
12. Фурман И. А. Технологическое визуальное программирование – новое средство автоматизации разработки программного обеспечения ПЛК / И. А. Фурман, С. А. Колесников // ИКСЗТ. – 2003. – № 4. – С. 46–48.
13. Бовчалюк С. Я. Концепція реалізації програмних засобів інформаційної технології паралельного логічного керування / С. Я. Бовчалюк // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, вип. 102 – Харків, 2010. – С. 83–84.
14. Development and study of technological visual programming of logic control problems / Ilya Furman, Stanislav Bovchaliuk, Alexander Allashev, Aleksey Piskarev // Eastern-European Journal of Enterprise technologies, – 2017. – № 6/2 (90). – P. 23–31.
15. Бовчалюк С. Я. Перспективи побудови інтелектуальних мереж SMART GRID базі ПЛІС-технологій / С. Я. Бовчалюк, С. О. Тимчук, О. М. Піскарьов [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – №5 (134). – С. 80–85.
16. Бовчалюк С. Я. Концепція побудови автомата паралельної дії із нечіткою логікою для формування інтелектуального ядра SMART GRID / С. Я. Бовчалюк, С. О. Тимчук // Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2017. – № 1(6). – С. 76–79.
17. Акушский, И. Я., Юдицкий Д. И. Машинная арифметики в остаточных классах: М., Радио и связь, 1968. 444 с.
18. Краснобаев В. А. Основні властивості непозиційної системи числення у класі лишків і їх вплив на структуру та принципи реалізації арифметичних операцій комп'ютерної системи / В. А. Краснобаев, С. О. Кошман, В. М. Курчанов [та ін.] // Системи управління, навігації та зв'язку, 2019. – Вип. 2(54) – С. 114–118.
19. Фурман И. А., Малиновский М. Л., Краснобаев В. А., Бовчалюк С. Я., Кошман С. А. Концепция, методы и средства моделирования на ПЛИС контроллеров и процессоров с параллельной архитектурой / И. А. Фурман, В. А. Краснобаев, С. Я. Бовчалюк [та ін.] // Автомобильный транспорт, вып. 16. – Харьков, 2005. С. 338–341.
20. Жихарев В.Я. Методы и алгоритмы реализации арифметических операций в классе вычетов / В.Я. Жихарев, Юнес Эль Хандасси, В.А. Краснобаев // Открытые информационные технологии и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ (ХАИ). – 2003. Вып. 20. – С. 84–101.
21. Жихарев В.Я. Влияние системы счисления на надёжность ЭВМ. / В.Я. Жихарев, Я.В. Илюшко, В.А. Краснобаев // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2004. - №1(5). С. 98–104.

Received (Надійшла) 15.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.03.2023

Determination of the development directions of control devices with parallel architecture based on FPGA

Stanislav Bovchaliuk, Oleksiy Piskarov, Stanislav Radchenko, Danyl Slabukho

Abstract. Topicality. Currently, the use of control devices and structures with parallel architecture to create control systems for responsible processes is not a rare phenomenon. At the same time, they are practically not used to create control systems for ordinary industrial objects and processes. Thus, the improvement of control devices with parallel architecture to improve their characteristics, which will allow them to be more widely used in the creation of control systems for ordinary (industrial, or even household) objects, is an urgent task. **The goal of this work** is the formation of requirements and directions for the improvement of control structures with parallel architecture, for the creation of modern PLC of parallel action based on FPGA, with extended functionality. **The subject** of research is the direction of development of control devices of parallel operation based on FPGA. As a **result** of the research carried out by the authors, the shortcomings of control devices with a parallel architecture were determined, which prevent their wide application for the construction of control systems of industrial facilities. Two main directions of development and improvement PLC of parallel action based on FPGA have been identified. **Conclusions.** Two main directions of development and improvement of parallel-action PLC based on FPGA have been identified, which are as follows: improvement of the internal structure of the parallel-action FPGA controller for the implementation of internal user-programmable timers and counters; construction and introduction to the structure of the FPGA controller of parallel action of the internal special processor in the RNS, for the implementation of arithmetic operations performed in one cycle of discrete automatic time.

Keywords: programmable logic controller of parallel action, FPGA controller, Residue Number System (RNS), technological visual programming (TVP).

В. В. Бойко, М. В. Підгорний

¹Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СИСТЕМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ БЕЗПЕЧНИМ РУХОМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Анотація. Стаття присвячена обґрунтуванню та застосуванню системної інформаційної технології розробки ефективного методу вирішення проблем керування безпечним рухом автотранспортних засобів. Розробка складних систем керування які в загальнонауковому змісті відображають відношення «частина-ціле» та «мета-засоби». Такі системи визначаються множиною елементів разом із сукупністю зв'язків між цими елементами. Використовуючи програмний комплекс у вигляді пакету прикладних програм «Fastog» розглянута задача та проведена параметрична ідентифікація трьохзв'язної динамічної системи, яка описує динаміку руху транспортного засобу, як об'єкту керування. Інтеграція інформаційних технологій забезпечує підвищення безпеки процесів керування рухом транспортних засобів. Дана інформаційна технологія дозволяє на системному рівні розглядати процес управління безпечним рухом автотранспортних засобів, а також розглядати процес управління з точки зору системності.

Ключові слова: технологія, структура, динамічна керована система, задача, метод, засоби керування.

Вступ

Постановка проблеми. Масове використання різних видів автомобільного, залізничного, водного і повітряного транспорту в забезпеченні соціально-економічного функціонування розвиненої країни обумовлює високі вимоги до безпеки транспортних засобів. Особливо актуальні ці вимоги до автотранспортних засобів (АТЗ). Безпечне використання

транспортних засобів повинне розглядатися системно (комплексно) - як умови і завдання успішного функціонування складової соціально-економічної системи.

Одним із напрямків вирішення проблеми безпеки є вдосконалення конструкційної якості, підвищення активної, пасивної, післяаварійної і екологічної безпеки автомобіля та поліпшення їх функціональних властивостей (рис. 1) [1, 2].

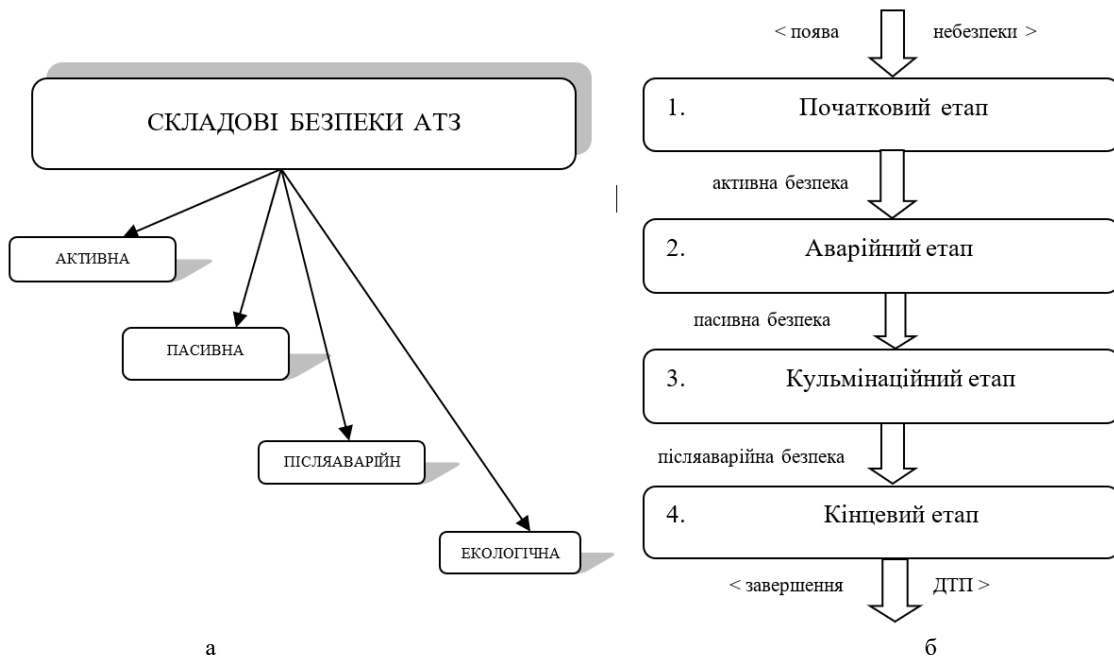


Рис. 1. Складові безпеки автотранспортного засобу (а) та схема життєвого циклу ДТП (б):

1. Початковий етап характеризується умовами руху автомобіля і пішоходів до виникнення небезпечної ситуації. Під небезпечною ситуацією слід розуміти таку дорожню ситуацію, при якій учасники руху повинні відразу прийняти всі необхідні заходи для уникнення події. 2. Аварійний етап характеризується такою дорожньою обстановкою, при якій учасники руху вже не в силі уникнути ДТП. 3. Кульмінаційний етап характеризується подіями, в результаті яких мають місце найтяжчі наслідки (руйнування автомобіля, травмування водія, пасажирів, пішоходів). 4. Кінцевий етап – це повна зупинка всіх учасників ДТП

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Яким би не був досконалим автотранспортний засіб, системи його, які відповідають за безпеку, про-являються тільки у системній взаємодії <людина> - <автомобіль> - <дорога> - <навколишнє середовище> [3].

Забезпечення безпеки системи <людина> - <автомобіль> - <дорога> - <навколишнє середовище> досягається запровадженням інформаційних технологій та інтелектуальних засобів управління з використанням системного підходу до вирішення проблеми.

Значну увагу підвищенню експлуатаційної надійності автомобілів, проблемам безпеки автомобілів, впровадженню прогресивних інформаційних систем приділено в роботах Е.А. Чудакова, Н.Е. Жуковського, А.И. Гришкевича, В.П. Тарасика та інших.

Метою роботи є застосування системного підходу як методології побудови інформаційної технології підвищення системної ефективності управління безпечним рухом транспортних засобів.

Основний матеріал

Розглядається динамічна система, рух якої описується диференціальними рівняннями:

$$m\ddot{y} + f(y, \dot{y}) = F(t), \quad (1)$$

де m - маса системи; змінні $y(t), \dot{y}(t)$ визначають положення системи та швидкість її руху в кожний момент часу; $F(t)$ - сила, що діє на систему.

Пряма задача динаміки формулюється наступним чином. Відома математична модель (1) руху системи і її стан в початковий момент часу

$$y(0) = y_0, \dot{y}(0) = \dot{y}_0.$$

Задана сила зовнішнього впливу $F(t)$. Необхідно знайти траєкторію руху системи $y(t), \dot{y}(t), t \geq 0$.

Обернена задача динаміки: необхідно знайти таку силу

$$F(t) = F^*(t), t \geq 0,$$

яка здійснює рух системи (1) з початковими умовами по назначеній траєкторії

$$y(t) = y^*(t), \dot{y}(t) = \dot{y}^*(t), t \geq 0.$$

На протязі тривалого часу дослідники вивчали рух різних систем під дією сил та моментів. Недавно було прийнято рахувати пріоритетною задачею динаміки – пряму задачу. Але із стрімким розвитком техніки керованого руху пріоритет змінився. Для розв'язку прямої задачі в сучасних умовах не існує складності, в зв'язку із сучасним математичним забезпеченням високопродуктивних ЕОМ. Зовсім по іншому складається із оберненими задачами, коли потрібно визначати сили та моменти керування рухом таких систем, як транспортні засоби, літальні апарати, підводні апарати, багатомасові механічні системи та інші об'єкти. А тому, актуальність розробки ефективних методів управління рухом таких систем зберігається, не дивлячись на значне досягнення в цій сфері.

Структурний підхід до побудови математичної моделі. Запропонована далі методика структурного опису динамічної системи, дає змогу застосувати формалізований опис системи на різних рівнях її представлення та використати в основі структурний підхід до опису систем. Побудова складних систем керування у загальнонауковому змісті слід відображати у відношенні «частина-ціле» та «мета-засоби». Така система визначається як множина елементів разом із сукупністю зв'язків між цими елементами.

Виходячи із визначення системи, як мережі зв'язних елементів, розглянемо можливість побудови структурованої моделі динамічної системи на прикладі автоматичної системи управління безпечним рухом автомобіля, як складного об'єкту дослід-

ження, який складається із об'єкта керування та засобів керування. Автомобіль, як керований об'єкт – це складна динамічна система з керованою структурою, функціонування якої розвивається у часі. Уявлення про таку систему слід базувати на поняттях входу, виходу і стану. Опис системи потребує опису базисних елементів, визначення векторів вхідних і вихідних впливів для кожного елемента, їх сукупності та для системи в цілому, а також опису про спосіб з'єднання елементів.

Загальні методи динаміки рухомого тіла базуються на принципах аналітичної механіки. Для опису динаміки на ряду із поступовим рухом потрібно розглядати коливання рухомих частин. Конструктивні зв'язки між окремими елементами направляють або обмежують їх рух. Число ступенів вільності всієї системи рівно сумі ступенів вільності окремих складових частин. Стан динамічної системи в будь-який момент часу визначається координатами, швидкостями та прискореннями [4].

Як відомо, рух АТЗ являє собою переміщення тіла по шести ступеням вільності. Вважаючи, що механічна система по кожному каналу може бути описана як диференціальна система другого порядку, рівняння її можна представити рівнянням (1), або в операторному вигляді:

$$G_{ij}(D) = \frac{b_r(D)}{a_r(D)}, \quad (2)$$

де $b_r(D) = \sum_{j=1}^m b_j D^j, a_r(D) = \sum_{i=1}^n a_i D^i,$

$$D = \frac{d}{dt}, m \leq n.$$

Структурний опис системи управління. Розглянемо трьохканальну систему, яка складена з трьох динамічних елементів. Для такої системи використаємо модель, складеної із трьох диференціальних рівнянь. Будемо вважати, що кожний із елементів має по одному входу та виходу. Як відомо, тільки система, що розкладається на елементи, може мати свою структуру [3]. Використаємо апарат матриць та векторів для представлення математичної моделі такої структурованої системи.

Нехай задано вектори X_e, X_c – входи відповідно елементів та системи в цілому, Y_e, Y_c – виходи елементів та системи відповідно, $S_{ee}, S_{ec}, S_{ce}, S_{cc}$ – $[0,1]$ матриці зв'язків між елементами відповідно, між елементами та системою, між системою та елементами та системні – між входом та виходом системи відповідно. Тоді система матричних рівнянь буде мати відповідний вигляд (рис. 2):

- $X_e = S_{ee}Y_e + S_{ec}X_c$ рівняння входів елементів,
- $Y_c = S_{ce}Y_e + S_{cc}Y_c$ рівняння виходів системи,
- $Y_e = G(D)_{ee}X_e$ рівняння виходів елементів, де

$$G_{ee} = \begin{pmatrix} G_{11}(D) & 0 & 0 \\ 0 & G_{ij}(D) & 0 \\ 0 & 0 & G_{nn}(D) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Структурний аналіз системи управління. Особливість структурного аналізу полягає в тому, що матриці зв'язків розглядаються як нові параметри, зміна яких в експерименті здійснюється за рахунок зміни $[0,1]$ елементів.

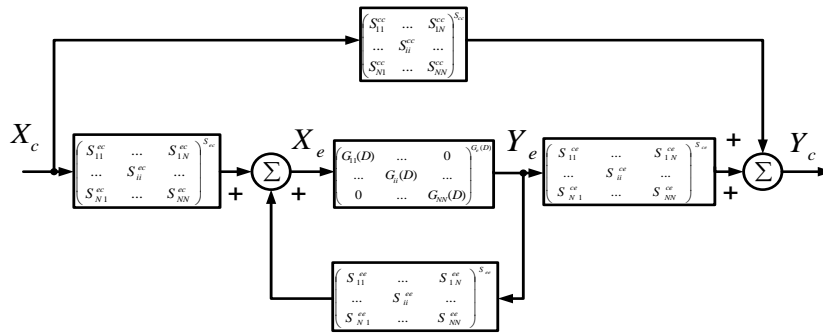


Рис. 2. Структурна схема структурованої системи управління

Трьохзв'язна система буде описуватися трьома системами, по кожному каналі якої буде задаватися матриця зв'язків:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де i – індекс зв'язку, що означає на який елемент відбувається дія; j – індекс зв'язку, що означає звідки приходить ця дія.

Повна сукупність зв'язків між елементами має вигляд:

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m G_{ij} \cdot S_{ij}. \quad (5)$$

Матриця зв'язків елементів визначається як матриця структури системи. Для формування системи на множині елементів накладено зовнішні (які організують <вхід>-<вихід>) і внутрішні (які організують елементи між собою) зв'язки.

Записана вище система матричних рівнянь може бути представлена в більш загальному вигляді:

$$\begin{aligned} a_{11}(D)x_1 + a_{12}(D)x_2 + a_{13}(D)x_3 &= b_{11}(D)y_1 + b_{12}(D)y_2 + b_{13}(D)y_3 \\ a_{21}(D)x_1 + a_{22}(D)x_2 + a_{23}(D)x_3 &= b_{21}(D)y_1 + b_{22}(D)y_2 + b_{23}(D)y_3 \\ a_{31}(D)x_1 + a_{32}(D)x_2 + a_{33}(D)x_3 &= b_{31}(D)y_1 + b_{32}(D)y_2 + b_{33}(D)y_3 \end{aligned} \quad (6)$$

або в матричному вигляді:

$$A(D)\vec{X} = B(D)\vec{Y}. \quad (7)$$

Якщо розглядати таку систему як об'єкт керування, то можна описати у наступному вигляді:

$$A(D)\vec{X} = B(D)\vec{U}, \quad (8)$$

де \vec{U} - вектор керування, або використовуючи перетворення Коші, отримаємо рівняння керування:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (9)$$

де параметри матриць A і B є складними функціями, які можуть бути визначені, використовуючи дані конкретного дослідження (відповідної марки автомобіля та його характеристик).

В результаті проведення спостереження за вхідними та вихідними даними об'єкта керування, як об'єкта ідентифікації, дають змогу використати метод параметричної ідентифікації для отримання значень параметрів A і B системи (рис. 3).

Параметрична ідентифікація. Постановка задачі параметричної ідентифікації. Потрібно визначити параметри A і B , знаючи вхідні та вихідні змінні.

Будемо вважати, що задані входи X у вигляді динамічних вимірних значень (табл.1).

Таблиця 1 – Входи X

t	1	2	3	4	5
X_1	0	20	40	60	80
X_2	2	3	4	5	6
X_3	10	5	0	5	10
U_1	1	0	1	4	9
U_2	0	0,5	0	1	1
U_3	0	0,5	1	1,5	2

Задаючи $x_1 \dots x_3, u_1 \dots u_3$ використаємо програму Ident [3,4] для опису табличних функцій в аналітичному вигляді $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ та $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= 20t - 20; \\ x_2(t) &= -1,5t^4 + 18t^3 - 76t^2 + 130t - 70; \\ x_3(t) &= 2t^2 - 13t + 21; \\ u_1(t) &= t^2 - 4t + 4; \\ u_2(t) &= -0.2t^4 + 2.5t^3 - 10.3t^2 + 17t - 9; \\ u_3(t) &= 0.96t^4 - 11.4t^3 + 46.5t^2 - 76t + 45. \end{aligned}$$

Шукаючи аналітичний вираз похідних отримаємо формульні вирази для похідних фазових координат X .

Підготовлена, таким чином, задача дає змогу перейти до використання програми Idyns, яка дозволяє знайти параметри матриць A і B при вхідних та вихідних даних. Значення матриць:

$$A = \begin{pmatrix} -1.4 & -2.6 & -5.5 \\ -5.8 & -22 & -20 \\ 0.2 & 0.3 & -0.1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 11 & 98.8 & 12.8 \\ 37 & 412.4 & 38.4 \\ 0.25 & -9.1 & -1.6 \end{pmatrix}.$$

Система рівнянь трьох каналної системи набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -1.4x_1 - 2.6x_2 - 5.5x_3 + 11u_1 + 98.8u_2 + 12.8u_3 \\ \dot{x}_2 &= -5.8x_1 - 22x_2 - 20x_3 + 37u_1 + 412.4u_2 + 38.4u_3 \\ \dot{x}_3 &= 0.2x_1 + 0.3x_2 - 0.1x_3 + 0.25u_1 - 9.1u_2 - 1.6u_3 \end{aligned} \quad (10)$$

Методи структурного синтезу. Синтез зводиться до пошуку таких перетворень, які дозволяють визначити бажаний закон керування в функції змінних системи (а не в функції часу). Відомо декілька методів реалізації такого підходу [5, 6]. При структурному синтезі автоматизованих систем в автоматичі одною із перших повинна розв'язуватись задача синтезу такого закону управління, який може включати в себе всі можливі змінні (комбінований).

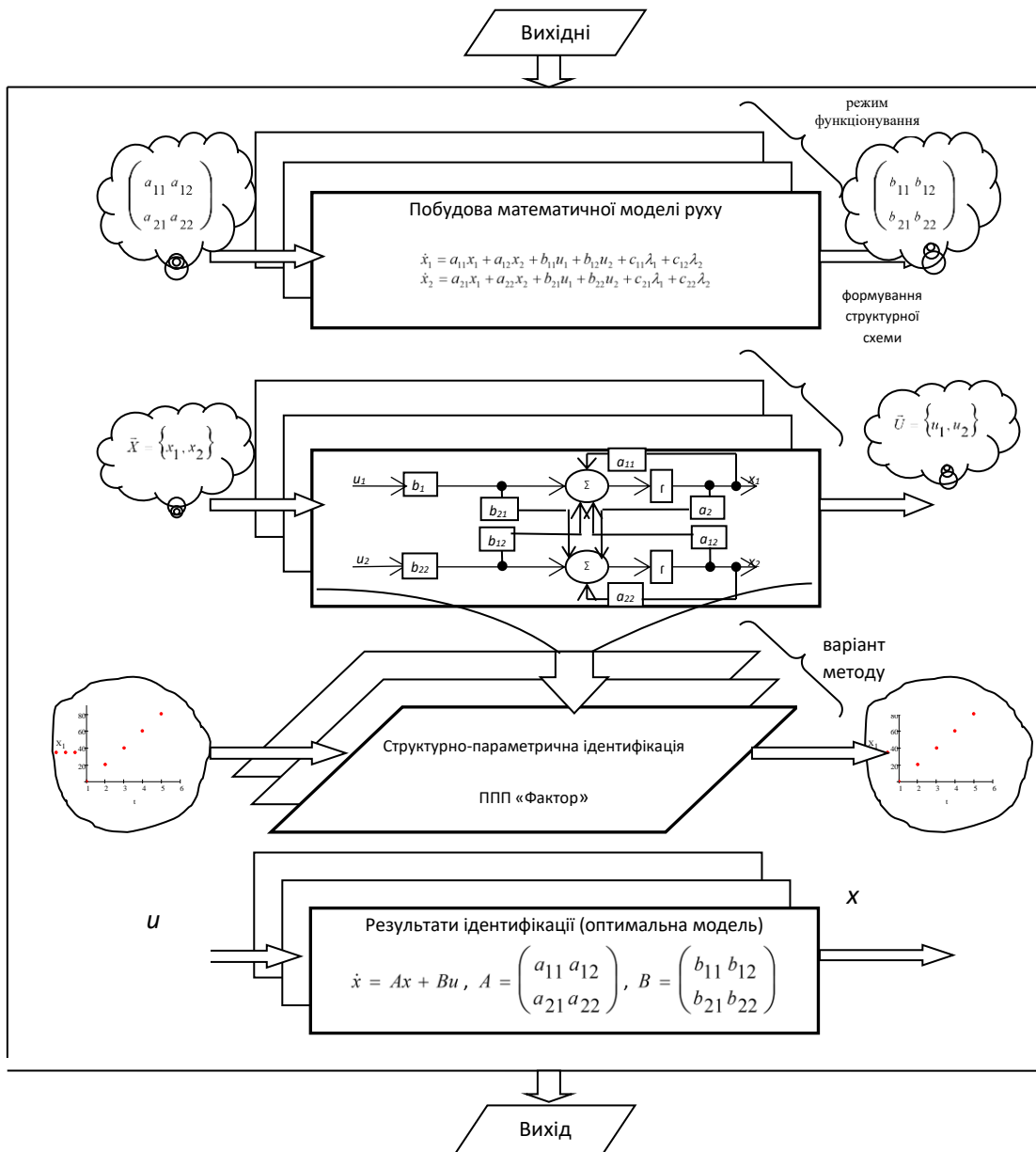


Рис. 3. Блок-схема алгоритму ідентифікації

Тоді синтез структури можна виконати виходячи із умови:

$$\varepsilon \equiv [x^{(n)} = x_z^{(n)}] = \begin{cases} 1 \text{ при } x^{(n)} = z; \\ 0 \text{ при } x^{(n)} \neq z. \end{cases} \quad (11)$$

Розглянемо задачу створення системи керування процесом руху автомобіля як об'єкту керування, з використанням засобів активної безпеки. Тоді автомобіль як об'єкт керування є багатозв'язною динамічною системою, рух якої може бути описаний системою диференціальних рівнянь, станів та виходів:

$$\begin{cases} \dot{X} = f_x(X, U, \lambda, t), \\ Z = f_z(X), \end{cases} \quad (12)$$

де $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – вектор змінних стану руху (швидкість, прискорення, напрям тощо); $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – вектор керуючих впливів (на гальмівну систему, на двигун, кермове управління); $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l\}$ – вектор збудовуючих впливів (активні та пасивні перешкоди, внутрішні або зовнішні змінні), Z – вихід, t – час.

Ставиться задача пошуку таких законів керування багатозв'язною системою (12), які б забезпечували бажану програму руху:

$$U = \phi(Y, X, U, \lambda), \quad (13)$$

де $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ – вектор програмних змінних бажаного руху (напрямок, швидкість, прискорення). Причому, при формуванні програмних змінних можуть бути використані ідеї функціонального керування.

Обернений метод структурного синтезу. Використовуючи рівняння бажаної системи можна отримати структуру відповідного закону управління, виходячи із умови (11) для рівняння динаміки об'єкту в узагальненому вигляді (12).

При цьому отримуємо закон керування у вигляді

$$u = f^{-1}(\dot{x}_z, x_z, \lambda, t). \quad (14)$$

Структурний синтез законів управління з метою компенсації впливу збудовень. Будемо вважати знайденим закон управління відповідно до використання

вищенаведеного методу. Тоді рівняння системи управління в лінійному випадку можна записати:

$$\bar{x} = W(D)(\bar{u} + \bar{\lambda}), \quad (15)$$

де \bar{u} – керуючий вплив, а $\bar{\lambda}$ – збурення.

Ставиться задача пошуку закону управління:

$$\bar{u} = \bar{u}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\lambda}, t), \quad (16)$$

який би надавав можливість компенсувати вплив збурення $\bar{\lambda}$. Синтез закону компенсації збурення виконується з використанням умови

$$\alpha = [\bar{e} \equiv 0] = \begin{cases} 1 \text{ при } \bar{x} = \bar{y}, \\ 0 \text{ при } \bar{x} \neq \bar{y}. \end{cases} \quad (17)$$

Поставлена задача може носити деякий оптимізаційний характер визначеного критерію (11) або (17). Будемо вважати, що при такій постановці:

$$e \equiv y - x \stackrel{\Delta}{=} 0 \text{ або } x \stackrel{\Delta}{=} y.$$

Модель об'єкта управління задається рівнянням (15). Виконуючи умову (17) отримуємо рівняння відносно невідомого \bar{u} :

$$\bar{y} - W(D)(\bar{u} + \bar{\lambda}) = 0,$$

звідки структура закону управління (рис. 4):

$$\bar{u} = W^{-1}(D)\bar{y} - \bar{\lambda}. \quad (18)$$

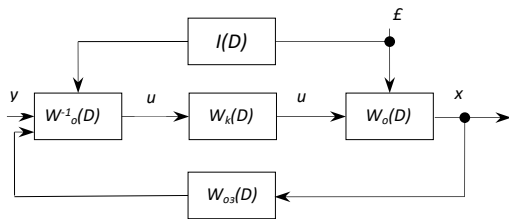


Рис. 4. Блок-схема інформантної системи управління

Для того, щоб управляти системою в заданих умовах треба відповідно відтворити завдання (\bar{y}) та компенсувати збурення ($\bar{\lambda}$). Якщо закон зміни збурення $\bar{\lambda}(t)$ невідомий, або його не можна виміряти, то відповідно він не може бути внесений і в закон управління.

Висновки

Викладені вище матеріали опису динамічних систем із змінюваною структурою при використанні структурного підходу, що дозволяє розчленувати систему на динамічну й структурну частини і формально описувати їх незалежно. Виконуючи наступний етап системної технології проведена структурна ідентифікація з використанням структурного підходу, який включає в себе завдання рівнянь зв'язків векторів входу й виходу та векторів входів й виходів сукупності елементів.

Використовуючи програмний комплекс у вигляді пакету прикладних програм «Factor» розглянута задача та проведена параметрична ідентифікація трьохзв'язної динамічної системи, яка описує динаміку руху транспортного засобу, як об'єкту керування. Наступним етапом системної технології є розв'язання задачі структурного синтезу законів керування прямолінійним рухом автомобіля, що дозволяє забезпечити рух об'єкта згідно необхідного програмного, яке визначається відповідно у завданні та вихідних змінних стану об'єкта.

Дана інформаційна технологія дозволяє на системному рівні розглядати процес управління безпечним рухом АТЗ, а також розглядати процес управління з точки зору системності та в взаємодії системи <людина>-<автомобіль> - <дорога> - <навколишнє середовище> .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Підгорний М.В., Бойко В.В. Застосування інформаційної технології в системних дослідженнях процесів управління безпечним рухом автотранспортних засобів. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів*. Миколаїв: ТОВ «МПРО», 2018. С.50-54.
2. Тимченко А.А., Бойко В.В., Скоробрещук В.В. Аналітичний огляд задач та методів побудови моделей складних систем. *Індуктивне моделювання складних систем*. К.: Міжнар. ННЦ інформ. технологій та систем, 2010. – Вип. 2. С. 247–256.
3. Пухов Г.Е., Жук К.Д. Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов: Институт кибернетики АН УССР, – К.:1966. – 219с.
4. Підгорний М.В., Бойко В.В., Лук'янченко О.М. Вирішення завдання керування розвантаженням системи електропостачання автомобіля. *Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів*. К.: НТУ, 2022. С. 165–168.
5. Снитюк В.Є. Прогнозування. Моделі. Методи. Алгоритми: Навчальний посібник. – К.: «Маклаут», 2008. – 364 с.
6. Бойчук Л.М. Структурный синтез автоматических многоуровневых систем функционального управления динамическими объектами: Препринт 74-23. – К.: изд. Ин-та кибернетики АН УССР, 1974. – 64 с.

Received (Надійшла) 17.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.02.2023

Information technology of system studies of safe vehicle traffic management processes

V. Boyko, M. Pidgorny

Abstract. The article is devoted to the substantiation and use of system information technology of building an effective method for solving the problems of managing the safe movement of motor vehicles. Constructions of complex control systems in the general scientific content reflect the relationship "part-whole" and "goal-means". Such a system is defined by a set of elements together with a set of connections between these elements. Using the software complex in the form of the "Factor" application program package, the problem was considered and parametric identification of a three-link dynamic system was carried out, which describes the dynamics of the vehicle as a control object. The integration of information technology provides an increase in the operational reliability of vehicles. This information technology makes it possible to consider the process of managing the safe movement of motor vehicles at the system level, as well as to consider the management process from the point of view of systemicity.

Keywords: technology, structure, dynamic controlled system, task, method, controls.

С. Ю. Гавриленко, В. В. Челак

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАНУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ ДЕРЕВ РІШЕНЬ

Анотація. Предметом дослідження є методи та засоби ідентифікації стану комп'ютерної системи. Метою статті є підвищення якості класифікації даних за рахунок розробки методу ідентифікації стану комп'ютерної системи. **Завдання:** дослідити методи ідентифікації стану комп'ютерної системи та розробити метод класифікації стану комп'ютерної системи з метою захисту даних. Використовуваними методами є: методи штучного інтелекту, машинного навчання. Отримано такі результати: досліджено методи ідентифікації стану комп'ютерної системи KNN (k-nearest neighbors), метод опорних векторів (SVM), нейронні мережі, дерева рішень. Запропоновано метод ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі нечітких дерев рішень, який відрізняється від відомих методів побудови наявністю спеціальної процедури фазифікації атрибутів вихідних даних та побудови функції приналежності. Розроблено програмне забезпечення, в якому реалізовано та досліджено запропонований метод вирішення задачі ідентифікації стану комп'ютерної системи. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає у дослідженні методів ідентифікації стану комп'ютерної системи, розробці методу на основі нечітких дерев рішень, оцінці якості моделі на етапі навчання та тестування, виконання порівняльного аналізу.

Ключові слова: комп'ютерна система, ідентифікація стану, обробка даних, машинне навчання, нечітка логіка, нечіткі дерева прийняття рішень.

Вступ

Сьогодні комп'ютерні технології є однією із ключових складових функціонування будь-якої держави і впливають на її безпеку та економічний успіх.

З початком повномасштабного вторгнення Росії в Україну в 2022 році кількість атак зросла в десятки разів. Кібератаки стали радше інструментом ведення бойових дій, аніж засобом тиску на окремих людей та їхні приватні дані.

Більшість кібератак була спрямована на державні сайти, транспортні компанії, енергетичний і фінансовий сектор [1].

Згідно статистики державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України, якщо до війни на державний сектор здійснили близько 143 тисяч атак, то в наступні місяці ця цифра стрімко зросла і досягла 25,1 мільйонів у вересні 2022 року. [1]

Як прогнозують експерти, кількість атак також буде збільшуватися. Це вимагає вдосконалення інфраструктури, перегляду стратегії інформаційної безпеки, архітектури комп'ютерної системи і методів впровадження та засобів ідентифікації їх стану, особливо в умовах постійної трансформації глобальної системи безпеки.

Крім того, сучасні умови політичного та соціально-економічного розвитку країни потребують балансу у розширенні вільного обміну інформацією та необхідністю дії окремих регламентованих обмежень на її поширення.

Комп'ютерна система (КС) характеризується великим обсягом показників (атрибутів) її функціонування. Це призводить до наявності труднощів з адекватного відбору атрибутів для ідентифікації стану КС в умовах зовнішніх впливів і розробки критерію оцінки, що відповідає обраним показникам [3].

Об'єктом дослідження є процес ідентифікації стану комп'ютерної системи.

Предметом дослідження є методи ідентифікації стану комп'ютерної системи.

Метою дослідження є розробка методу ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі використання нечітких дерев рішень.

Огляд літератури. Функціонування КС характеризується великою кількістю процесів [3], в тому числі породжених впливом шкідливого програмного забезпечення. Для аналізу цих даних використовуються складні математичні алгоритми, що базуються на машинних методах навчання [4]. Найбільш популярні алгоритми машинного навчання наведено в [5]. Основною зазначених методів є технології і процедури, які вирішують завдання ідентифікації стану КС та виявлення аномалій в даних [6, 7]. Наразі активно використовуються метод k найближчих сусідів (k-nearest neighbors)[8, 9]; SVM – метод опорних векторів [10, 11]; нейронні мережі, ансамблеві методи [12] та ін.

Але більшість із моделей, наприклад, нейронні мережі моделі поводяться як «чорна скринька», яка не пояснює, чому з таких вхідних даних вийшов саме цей результат. Крім того відсутня достатня для коректного навчання ML-моделей кількості навчальних та тестових даних у всіх напрямках кіберзагроз, від комп'ютерних вірусів до прийомів соціальної інженерії. Зловмисники також використовують алгоритми машинного навчання для створення шкідливих програм, аналізу користувача поведінки, розробки ботів-збирачів персональних даних, пошуку вразливостей, підбору паролів, підміни особистості, обходу систем захисту та ін. Можливі специфічні атаки на ML-алгоритми та використовувані набори даних, що може призвести до невірних рішень, пропущених атак або помилоків спрацювань;

Проведений аналіз показав, що основними недоліками даних методів є зневага факторами нечітких даних і низька адаптація до динамічних змін структур вихідних даних та зовнішніх дій, що у своїй послідовності призводить до зниження достовірності ідентифікації [13].

Одним із ефективних методів машинного навчання є використання дерев рішень (ДР, Decision

Trees), які успішно застосовують у багатьох областях, вирішуючи завдання класифікації, регресії та вибору підмножини ознак ідентифікації [2, 3, 14].

ДР є популярними моделями машинного навчання. Для побудови дерева на кожному внутрішньому вузлі необхідно знайти таку умову, яка б розбивала множину, що асоціюється з цим вузлом на підмножини. В якості перевірки повинен бути вибраний один з атрибутів. Загальне правило для вибору атрибуту можна сформулювати таким чином: вибраний атрибут повинен розбити множину так, щоб отримані у результаті підмножини склалися з об'єктів, що належать до одного класу, або були максимально наближені до цього, тобто кількість об'єктів з інших класів («домішок») в кожній з цих множин була якомога меншою. На вхід алгоритму можна подавати всі існуючі атрибути, алгоритм сам вибере найбільш значущі і вони будуть використані для побудови дерева [15].

ДР є наочними та дозволяють зрозуміти та пояснити, чому конкретний об'єкт відноситься до того чи іншого класу. Дають змогу відображати правила з бази даних природною мовою. Дозволяють створювати моделі у тих галузях, де аналітику досить складно формалізувати знаннями. Більше того, їх індукційний процес є зазвичай швидким, вимагає невеликих обчислювальних ресурсів.

Більшість алгоритмів побудови ДР мають можливість спеціальної обробки пропущених значень, працюють і з числовими та з категоріальними типами даних. ДР, на відміну багатьох методів, будують непараметричні моделі і здатні обробляти категоріальні значення.

Однак алгоритм ДР має ряд недоліків. Основний з них – це застосування експертного методу при формуванні ймовірностей настання того чи іншого сценарію. Це пов'язано не лише із суб'єктивізмом аналітика-експерта, але і з неможливістю, в ряді випадків, точно спрогнозувати багатьох ймовірностей настання сценарії, наприклад використання нового сценарію кібератаки. Особливо це актуально при ідентифікації стану КС, оскільки тут існує чимало факторів, які важко передбачити. Цей недолік можна зменшити, застосовуючи нейронні мережі, теорію нечітких множин та відповідне програмне забезпечення [16].

Крім того, якщо значення атрибутів знаходяться на межі розмежування класів, то більш ефективним є також використання апарату нечіткої математики та ДР, який пристосований для ідентифікації стану КС в цих умовах [17].

Підходи та методи

Нечітка логіка – це математичний підхід, що базується на понятті нечіткої множини і вивчає певні процеси та явища з функцією приналежності елемента до множини. В основі цього підходу лежить теорія, викладена в серії робіт Л. Заде в 1965-1973 роках. Саме в його роботах розглядаються елементи множини, для яких функція приналежності представляє собою не жорсткий поріг (належить / не належить), а плавну сигмоїду (часто спрощено ламану лінію), що

проходить через всі значення від нуля до одиниці [18]. Таким чином, даний метод дозволяє більш точно описувати комплексні явища, події, величини завдяки можливості описати їх не лише одним усередненим числом, а логічним відображенням, яке є найбільш близьким до того, як його розуміють з сприйняття зовнішнього світу. Тобто теорія нечітких множин дозволяє отримати більш точне відображення реального світу в математичних моделях.

Нечіткі підхід є одним із розширень класичної моделі ДР [19]. На відміну від простих дерев рішень, де кожен приклад належить конкретному вузлу, нечітке дерево рішень використовує ступінь приналежності. Нечіткий підхід краще адаптований до умов реального світу. Різні бази нечітких правил можна з легкістю об'єднати. Крім того, поняття нечіткої множини цілком узгоджується з інтуїтивними уявленнями про навколишній світ, так як велика частина використовуваних понять за своєю природою є нечіткою та розмитою.

Комбінація нечітких систем та дерев рішень дає нечітке дерево рішень (НДР, Fuzzy Decision Trees). При використанні нечіткого підходу у кінцевій оцінці поряд із числовим результатом буде одержано і розподіл його істинності у вигляді відповідної функції приналежності. Причому характер функції (ступінь розмитості) приналежності характеризуватиме і ступінь нечіткості рішення та може інтерпретуватися як функція розподілу оцінок істинності прийнятого рішення. Таким чином, при використанні НДР не втрачаються знання про те, що об'єкт може мати властивості як однієї ознаки, так і іншої в тій чи іншій мірі.

Перевагами НДР є висока точність класифікації, яка отримана за рахунок використання нечіткої логіки, швидкий процес навчання та простота результату для інтерпретації. Нечіткий підхід, інтегруючи поняття нечітких множин та ентропії стає все більш популярним при аналізі даних, особливо які знаходяться на межі розмежування, при вирішенні проблем невизначеності, шуму і неточності даних. Здатність алгоритму видавати для нового об'єкту ступінь приналежності до класу дозволяє управляти порогом прийняття рішень для класифікації.

Відмінною рисою НДР є те, що для кожного атрибуту необхідно виділити кілька його лінгвістичних значень і визначити ступінь приналежності прикладів (об'єктів) до них. Замість кількості прикладів конкретного вузла НДР групує їх ступінь приналежності.

Процес побудови НДР починається з фазифікації атрибутів x_i вихідних даних, побудови функцій приналежності та визначення ступеня приналежності об'єктів (прикладів) до кожного із них. Надалі процес повторюється ітераційно та починається зі знаходження атрибуту умови, що визначає поточний вузол дерева (при цьому спочатку визначається кореневий вузол дерева):

1. Визначити значення загальної ентропії, яка дає середню кількість інформації для визначення класу об'єкта з множини:

$$E(S^N) = - \sum_i \frac{P_i^N}{P^N} \cdot \log_2 \frac{P_i^N}{P^N}, \quad (1)$$

де P^N – коефіцієнт що містить загальні характеристики прикладів вузла N .

2. Визначити коефіцієнти P_i та ентропію для розбиття за кожним атрибутом A

$$P_i^N = \sum_{S^N} \min(\mu_N(D_j), \mu_i(D_j)); \quad (2)$$

$$E(S^N, A) = \sum_j \frac{P^{N|j}}{P^N} \cdot E(S^{N|j}), \quad (3)$$

де вузол $N|j$ – дочірній для вузла N .

3. Обчислити інформаційний приріст для кожного із атрибутів

$$G(S^N, A) = E(S^N) - E(S^N, A). \quad (4)$$

4. Визначити атрибут A^x з максимальним приростом інформації G :

$$A^x = \arg \max_A G(S, A). \quad (5)$$

5. Використати атрибут A^x у якості вузла дерева N та видалити його із списку атрибутів, які ще не було оброблено.

6. Вузол N розбити на кілька підсистем N_j . Перерахувати ступінь приналежності μ атрибутів до наступного ярусу:

$$\mu_{Mj}(e_k) = \min(\mu_{Mj}(D_k), \mu_{Mj}(D_k, a_j)). \quad (6)$$

7. Якщо всі приклади підвузла $N|j$ мають ступінь приналежності, що дорівнює нулю, то такий підвузол видалити так як не існує жодного прикладу, де присутня така комбінація лінгвістичних значень.

8. Якщо не досягнуто максимальної глибини дерева або усі атрибути не використано, то повернутися до п. 1 інакше закінчити побудову дерева.

Таким чином, в режимі навчання формується база правил та будується НДР. У кожному вузлу дерева під час навчання формуються функції приналежності атрибутів до наступного ярусу ДР. При цьому, на відміну від звичайних дерев рішень, кількість листків (дуг) НДР може бути більшою ніж дві дуги.

Належність до цільового класу для нового об'єкту визначається формулою:

$$\sigma_j = \frac{\sum_l \sum_k P_k^l \cdot \mu_l(D_j) \cdot \chi_k}{\sum_l (\mu_l(D_j) \cdot \sum_k P_k^l)}, \quad (7)$$

де P_i^k – коефіцієнт співвідношення прикладів листа дерева для значення цільового класу k , $\mu_l(D_j)$ – ступінь

приналежності прикладу до вузла l , χ_k – приналежність значення цільового класу k до позитивного значення результату класифікації.

Експериментальні дослідження та оцінка ефективності

Однією із проблем класифікаторів на основі нечітких дерев рішень є автоматизація процесу фазифікації атрибутів вихідних даних та налаштування НДР.

В даній роботі запропоновано метод побудови НДР, який відрізняється від відомих методів наявністю автоматизованої спеціальної процедури фазифікації атрибутів вихідних даних та побудови функції приналежності:

1. Нехай об'єкт спостереження може знаходитися в одному із двох станів H_1 та H_2 . Стан об'єкту визначається значеннями p атрибутів (показників) x_1, x_2, \dots, x_n . Передбачається, що числові значення атрибутів, які контролюються, є нормально розподіленими випадковими величинами, причому їх математичні сподівання визначаються вектором

$$M = (m_1, m_2, \dots, m_p).$$

2. Для кожного атрибуту x_i розраховуються характеристики: математичне очікування m , дисперсія D , середнє квадратичне відхилення σ .

3. Якщо отримане значення дисперсії $D \leq 5$, то фазифікація атрибуту відбувається за рахунок побудови трьох функцій приналежності μ_1, μ_2, μ_3 (рис. 1):

$$\mu_1(x_i, m_i, \sigma_i) = \begin{cases} 1, & x_i < m_i - 3\sigma_i, \\ \frac{m_i - \sigma_i - x_i}{2\sigma_i}, & m_i - 3\sigma_i \leq x_i < m_i - \sigma_i, \\ 0, & m_i - \sigma_i \leq x_i; \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_2(x_i, m_i, \sigma_i) = \begin{cases} 0, & x_i < m_i - 3\sigma_i, \\ \frac{x_i - m_i + 3\sigma_i}{2\sigma_i}, & m_i - 3\sigma_i \leq x_i < m_i - \sigma_i, \\ 1, & m_i - \sigma_i \leq x_i < m_i + \sigma_i \\ \frac{m_i + 3\sigma_i - x_i}{2\sigma_i}, & m_i + \sigma_i \leq x_i < m_i + 3\sigma_i, \\ 0, & m_i + 3\sigma_i \leq x_i; \end{cases} \quad (9)$$

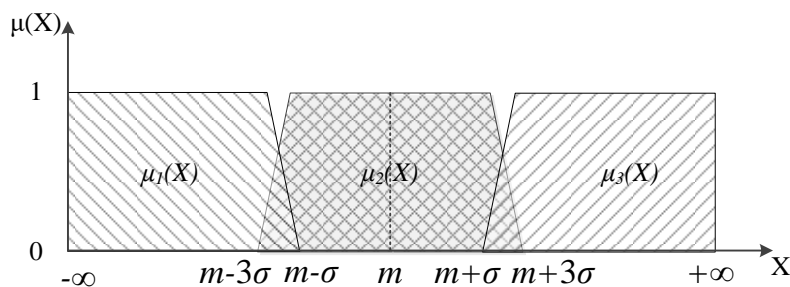


Рис. 1. Графічне подання функцій приналежності атрибуту ($D \leq 5$)

$$\mu_3(x_i, m_i, \sigma_i) = \begin{cases} 0, & x_i < m_i + \sigma_i, \\ \frac{x_i - m_i - \sigma_i}{2\sigma_i}, & m_i + \sigma_i \leq x_i < m_i + 3\sigma_i, \\ 1, & m_i + 3\sigma_i \leq x_i. \end{cases} \quad (10)$$

4. Якщо отримане значення дисперсії $D > 5$, то фазифікація вихідних даних відбувається за рахунок кластеризації атрибутів, наприклад алгоритмом DBSCAN. При цьому кількість нечітких множин визначається кількістю кластерів.

5. Для кожного кластеру будується трапецієвидна функція приналежності. При цьому, на відрізку $[b;c]$ де функція приналежності дорівнює одиниці знаходиться 80% елементів. Відповідно, на відрізках $[a;b]$ та $[c;d]$ (часткова належність) знаходиться 20% елементів кластеру (рис.2).

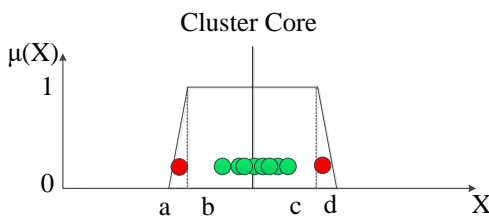


Рис. 2. Приклад побудови функції приналежності при кластеризації атрибутів

Проведені дослідження надали можливість оцінити показники якості класифікації на основі дерев рішень з багатовимірними вузлами (MD DT), запропонованого авторами в [3] та методу класифікації даних на основі нечітких дерев рішень зі спеціальною процедурою формування нечітких множин і функцій приналежності (FDT) [20]. Результати оцінки наведено в табл. 1 (Accuracy (ACC), Precision (PPV), Recall (TPR), Probability of false alarm (fall-out, FPR), Miss rate (FNR)).

Таблиця 1 – Показники якості класифікації на основі методів MD DT та FDT, зі спеціальною процедурою формування нечітких множин і функцій приналежності

Показники якості	Навчальний набір даних		Тестовий набір даних	
	MD DT	FDT	MD DT	FDT
ACC	1	0,9997	0,91	0,932
PPV	1	0,9997	0,86	0,889
TPR	1	1	0,972	0,987
FPR	0	0,0007	0,154	0,123
FNR	0	0	0,028	0,013

Як видно із таблиці, використання процедури формування нечітких множин на етапі навчання моделі надає можливість підвищити точність ідентифікації (при цьому, помилка на навчальній вибірці складає 0,03% на тестовій - 6,8%).

Крім того виконано оцінку методів класифікації на основі MD DT та FDT (рис. 3, 4) з використанням ROC-кривої.

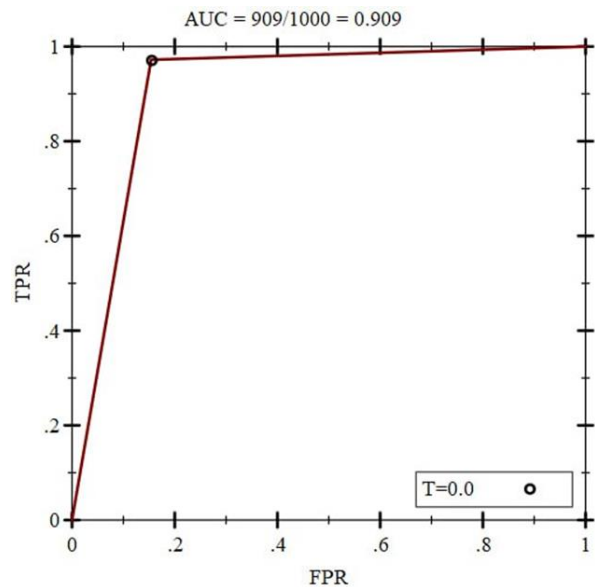


Рис. 3. Рос крива якості класифікації на основі MD DT

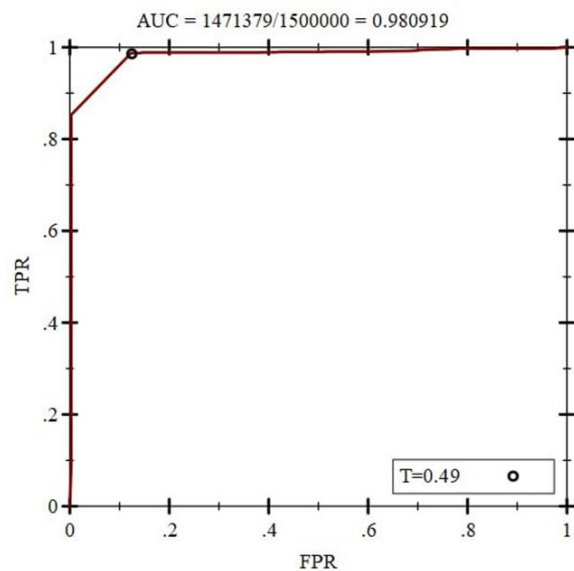


Рис. 4. Рос крива якості класифікації на основі FDT

Як видно із рис.3, методи класифікації на основі MD DT та FDT є якісними. Метод на основі нечітких дерев рішень зі спеціальною процедурою формування нечітких множин і функцій приналежності показав кращий результат.

Також досліджено на класифікатори на основі модифікацій алгоритмів SVM [19] та KNN [20] та виконано порівняльний аналіз. Результати дослідження наведено на рис 5, 6. Рис. 5 містить помилки класифікації на етапі навчання (Bias), рис. 6 – на етапі тестування моделі (Variance).

Як видно із рис. 5, 6 використання методу класифікації даних на основі нечітких дерев рішень зі спеціальною процедурою формування нечітких множин і функцій приналежності дозволило підвищити точність класифікації на етапі тестування на 2,3% за рахунок формування нечітких множин та зменшення кількості ярусів дерева рішень.

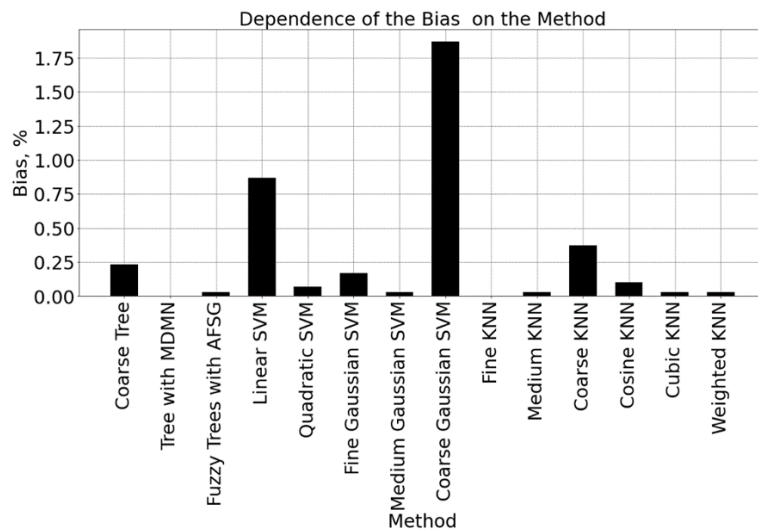


Рис. 5. Помилки класифікації на етапі навчання моделі (Bias)

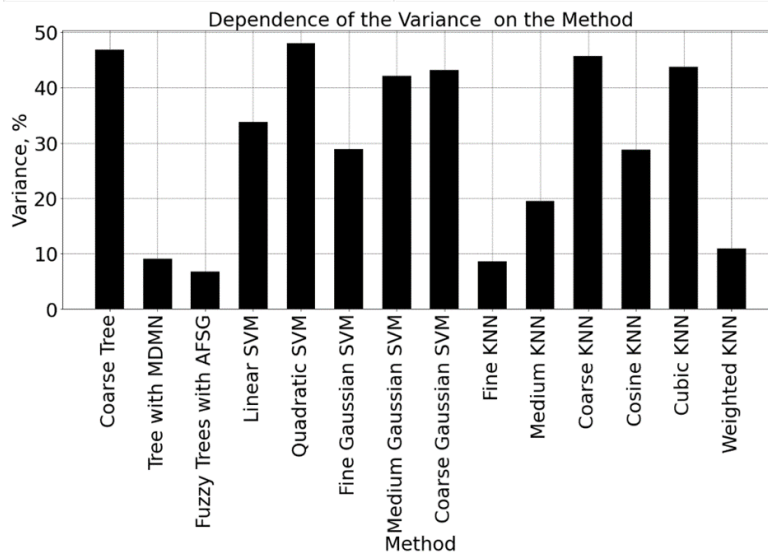


Рис. 6. Помилки класифікації на етапі тестування моделі (Variance)

Висновки

Таким чином, у роботі вирішено завдання підвищення оперативності та точності ідентифікації стану функціонування КС.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше запропоновано метод ідентифікації стану КС на основі НДР, який відрізняється від відомих методів побудови НДР наявністю спеціальної процедури фазифікації атрибутів вихідних даних та побудови функції приналежності.

При цьому фазифікація атрибутів є автоматизованою та відбувається за рахунок статистичного

аналізу атрибутів аналізу або їх кластеризації, наприклад, алгоритмом DBSCAN.

Результати моделювання показали, що запропонований метод надає можливість зменшити кількість ярусів дерева рішень, що дозволяє підвищити оперативність ідентифікації стану комп'ютерної системи. Використання процедури формування нечітких множин на етапі навчання моделі надає можливість підвищити точність ідентифікації (при цьому, помилка на навчальній вибірці складає 0,03% на тестовій - 6,8%).

Недоліком даного методу є необхідність використання більшої кількості обчислювальних ресурсів при побудові НДР.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. О. Вдовенко. 25 мільйонів кібератак щомісяця. Як Росія намагається зашкодити Україні в цифровому просторі. URL: <https://detector.media/infospace/article/204308/2022-10-29-25-milyoniv-kiberatak-shchomisyatsya-yak-rosiya-namagaietsya-zashkodyty-ukraini-v-tsyfrovomu-prostori/>.
2. S. Y. Gavrylenko & I. V. Sheverdin, "Development Of Method To Identify The Computer System State Based On The «Isolation Forest» Algorithm". Radio Electronics, Computer Science, Control, 2021(1), pp. 105–116, doi:10.15588/1607-3274-2021-1-11

3. S.Y. Gavrylenko, V.V. Chelak and S.G. Semenov Development of Method for Identification the Computer System State based on the Decision Tree with Multi-Dimensional Nodes, Radio Electronics, Computer Science, Control (RECS) – No. 2 (2022). – 2022. – pp.113-121, doi: 10.15588/1607-3274-2022-2-11.
4. Leon Reznik, "Computer Security with Artificial Intelligence, Machine Learning, and Data Science Combination," in *Intelligent Security Systems: How Artificial Intelligence, Machine Learning and Data Science Work For and Against Computer Security*, IEEE, 2022, pp.1-56, doi: 10.1002/9781119771579.ch1.
5. Amarudin, R. Ferdiana and Widyan, "A Systematic Literature Review of Intrusion Detection System for Network Security: Research Trends, Datasets and Methods," *2020 4th International Conference on Informatics and Computational Sciences (ICI-CoS)*, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICICoS51170.2020.9299068.
6. J. J. Davis and A. J. Clark, "Data preprocessing for anomaly based network intrusion detection: A review", *Computers & security*, 2011, vol. 30, no. 6-7, pp. 353-375, doi:10.1016/j.cose.2011.05.008.
7. J. Tai, I. Alsmadi, Y. Zhang and F. Qiao, "Machine Learning Methods for Anomaly Detection in Industrial Control Systems," *2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2020, pp. 2333-2339, doi: 10.1109/Big-Data50022.2020.9378018.
8. S. Sun and R. Huang, "An adaptive k-nearest neighbor algorithm," *2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2010, pp. 91-94, doi: 10.1109/FSKD.2010.5569740.
9. S. Malhotra, V. Bali and K. K. Paliwal, "Genetic programming and K-nearest neighbour classifier based intrusion detection model," *2017 7th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering - Confluence*, 2017, pp. 42-46, doi: 10.1109/CONFLUENCE.2017.7943121
10. P. Gattineni and G. R. S. Dharan, "Intrusion Detection Mechanisms: SVM, random forest, and extreme learning machine (ELM)," *2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2021, pp. 273-276, doi: 10.1109/ICIRCA51532.2021.9544551.
11. L. Lin, R. Zuo, S. Yang and Z. Zhang, "SVM ensemble for anomaly detection based on rotation forest," *2012 Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, 2012, pp. 150-153, doi: 10.1109/ICICIP.2012.6391455.
12. M. I. Sayed, I. M. Sayem, S. Saha and A. Haque, "A Multi-Classifer for DDoS Attacks Using Stacking Ensemble Deep Neural Network," *2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2022, pp. 1125-1130, doi: 10.1109/IWCMC55113.2022.9824189.
13. S. Gavrylenko, V. Chelak and O. Hornostal, "Research of Intelligent Data Analysis Methods for Identification of Computer System State," *2020 XXX International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/MMA49863.2020.9254252.
14. N. Kumar, H. Akash, R. A. Prataap, G. Srinath and C. Mala, "Intelligent Intrusion Detection System using Decision Tree Classifier and Bootstrap Aggregation," *2018 8th International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED)*, 2018, pp. 199-203, doi: 10.1109/ISED.2018.8704056.
15. J. Ye et al., "A Chi-MIC Based Adaptive Multi-Branch Decision Tree," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 78962-78972, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077125.
16. F. Q. Li, S. -L. Wang, A. W. -C. Liew, W. Ding and G. -S. Liu, "Large-Scale Malicious Software Classification With Fuzzified Features and Boosted Fuzzy Random Forest," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 11, pp. 3205-3218, Nov. 2021, doi: 10.1109/TFUZZ.2020.3016023.
17. S. Semenov, O. Sira, S. Gavrylenko, N. Kuchuk. Identification of the state of an object under conditions of fuzzy input data, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, Vol 1, No 4 (97), pp.22-29, doi: 10.15587/1729-4061.2019.157085
18. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений, М.: Мир, 1976, 166 с.
19. Sumalatha and P. U. Sankar, "Fuzzy random decision tree (FRDT) framework for privacy preserving data mining," *2016 SAI Computing Conference (SAI)*, 2016, pp. 195-202, doi: 10.1109/SAI.2016.7555982.
20. and O. Hornostal, "Construction Method Of Fuzzy Decision Trees For Identification The Computer System State," *2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-5, doi:10.1109/MMA55579.2022.9992878

Received (Надійшла) 12.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.03.2023

Development of method base on fuzzy decision trees for identification of the computer systems state

S. Gavrylenko, V. Chelak

Abstract. The **subject** of research is the methods and means of identifying the state of the computer system. The **purpose** of the article is to improve the quality of data classification by developing a method for identifying the state of the computer system. **Task:** to investigate methods of identifying the state of a computer system and to develop a method of classifying the state of a computer system for the purpose of data protection. **Methods used:** artificial intelligence methods, machine learning, decision tree methods. The following results were obtained: methods of identifying the state of the computer system KNN (k Nearest Neighbors), support vector method (SVM), neural networks, decision trees were investigated. **The results were obtained:** a method of identifying the state of the computer system based on of fuzzy decision trees, which differs from the known methods of fuzzy decision trees by the presence of a special procedure for falsification the attributes of source data and constructing membership function was proposed. The software was developed, in which the proposed method of solving the problem of identifying the state of the computer system was implemented and investigated. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results lies in the study of methods for identifying the state of the computer system, the development of a method based on fuzzy decision trees, the assessment of the quality of the model at the stage of training and testing, and the performance of a comparative analysis.

Keywords: computer system, state identification, data processing, machine learning, fuzzy logic, fuzzy decision trees.

G. Golovko, M. Kalynovych

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

SPECIFICS OF IMPLEMENTATION OF THE ASYMMETRIC ENCRYPTION ALGORITHM ON ELLIPTIC CURVES

Abstract: The modern world is inextricably linked with information technologies. Every year, the Internet expands, and thousands of sites that provide various services have been created. With a stable Internet connection, you can solve most of life's problems without leaving home – from ordering dinner to receiving government services. Nowadays, when educational institutions and businesses have been forced to switch to a remote form of work due to the pandemic, the issue of information protection is more pressing than ever. There are many cryptographic algorithms that have protected our information on the Internet for decades, but as computing power grows, so do the demands on such algorithms. Some of them have not coped with the challenge of time and are no longer used, which is why there is a need to develop new algorithms that use more complex mathematical principles and provide a higher level of security. And there is a whole class of algorithms that use the principles of elliptic curves to provide greater security with relatively lower use of system resources.

Keywords: Cryptography, Public-key cryptography, ECC, RSA, ASP.NET, Cybersecurity, Encryption.

Introduction

Information is the result of human interaction with the environment. It is both the cause of actions and their consequences. And therefore, the possession of information and its processing determines and changes our world and people's lives. Nowadays, when information has become more accessible than ever, it is especially important to keep certain information secret. It is easy to assume that no company will like it if its corporate documents become public. This threatens multimillion-dollar damages and loss of reputation, or even worse when it comes to personal information of employees or secret developments.

A truly secure computer is one that hasn't connected to any network, even an electrical one, but it is impossible to use such a computer. The modern world is inextricably linked with information technologies. Large masses of information are constantly being transferred over the Internet, and it is not very difficult to intercept it therefore, there is a need to transmit information in a protected form so that even if was intercepted, an attacker cannot use it. Also, when transmitting information in open networks, such as the Internet, it is important to confirm the identity of the sender and recipient. Cryptography deals with these and other problems. There are hundreds of different encryption algorithms that use various mathematical principles to protect information.

Data protection is a set of measures not limited to cryptographic protection. Technical, engineering, and organizational protection are also distinguished. Technical protection includes hardware and technical measures to restrict access to the information carrier, such as routers, firewalls, antiviruses, etc. Engineering protection exists to prevent the physical destruction of the information carrier. Organizational protection limits access to information by third parties, for example, by using access control rules [1].

Literature Analysis

Modern encryption algorithms can be divided into two classes: symmetric and asymmetric. Symmetric encryption algorithms use one key to encrypt and decrypt

information, so this key must be private and known only to those who exchange information. On the opposite, asymmetric algorithms (also public-key algorithms) use two keys: a public key for encrypting data and a private key for decryption. The feature of these algorithms is that generating a public key based on a private key is a simple task, but restoring the private key by knowing the public key is very difficult. Each of these classes has its advantages and disadvantages. Yes, symmetric algorithms are much faster and more reliable because they use much simpler mathematical principles, but the main difficulty is the exchange of the private key. The most popular algorithms of this type are RC4, AES, DES, 3DES, and QUAD. Asymmetric algorithms exchange data according to the following scheme. The User A generates his private key p_A and, based on it, calculates the public key P_A , similarly, the user B generates his own pair of keys p_B and P_B . Users exchange public keys over an insecure channel, after which the user A can encrypt information with the public key P_B , and only the user B can decrypt his messages with the private key p_B . Similarly, only the user A can decrypt a message encrypted with the public key P_A . Representatives of this class are the following algorithms: RSA, Diffie-Hellman, and ECC.

In practice, hybrid algorithms are often used, which take into account the shortcomings of both classes of algorithms. They are not a separate class of encryption algorithms but a combination of two classes. Their main point is to use an asymmetric algorithm to exchange a private key, which will be used to encrypt information using a symmetric algorithm [2].

With the growth of computing capabilities, the need for more reliable algorithms grows. Also, over time, vulnerabilities are found in existing algorithms. So, DES and 3DES algorithms no longer meet modern security requirements and are hardly used. A partial solution to this problem is to increase the key size. For example, the standard key size for the asynchronous RSA algorithm is now 2048 bits. But there is the more reliable and relatively new algorithms class ECC, which stands for Elliptic Curve Cryptography, which is being used more and more often. In particular, this algorithm is used by various cryptocurrencies, including Bitcoin.

Due to its greater mathematical complexity, the ECC algorithm provides the same level of security with a smaller key size (Table 1) [3].

Table 1 – Comparison of the security level with different key sizes

Security bits	RSA	ECC
80	1024	160
112	2048	224
128	3072	256
192	7680	384
256	15360	512

Table 2 – Intuitive security levels

Security level	Volume of water to bring to a boil	Bit-lengths		
		Symmetric key	Cryptographic hash	RSA modulus
Teaspoon security	0.0025 liter	35	70	242
Shower security	80 liters	50	100	453
Pool security	2 500 000 liters	65	130	745
Rain security	0.082km ³	80	160	1130
Lake security	89 km ³	90	180	1440
Sea security	3 750 000 km ³	105	210	1990
Global security	1 400 000 000km ³	114	228	2380
Solar security	-	140	280	3730

Over time, the need for more secure algorithms grows, but a simple increase in the key size leads to an increase in the load on the system. So, it is appropriate to use more complex algorithms that provide the same level of security with a much smaller key size. That is why the ECC algorithm has been gaining more and more popularity lately.

Object, subject, and methods of research

Research object: cryptography.

Subject of research: cryptography on elliptic curves.

Research method: implementation of the ECC algorithm for the organization of a secure data transmission channel over the Internet.

In general, elliptic curves are described by the following equation:

$$y^2 = x^3 + ax + b, \quad (1)$$

where $4a^3 + 27b^2 \neq 0$ – this condition allows us to exclude special curves that cross the point $O(0; 0)$ and are not full-fledged elliptic curves.

An important property of elliptic curves is that they are symmetrical about the x-axis (Fig. 1).

To further perform mathematical operations on the elliptic curve, it is necessary to define a group. A group is a non-empty set G for which a binary operation has been defined. The group for which the addition operation "+" has been defined is called additive. The group must satisfy the following conditions:

1. Associativity: $a + (b + c) = (a + b) + c$.
2. There exists a zero element O such that $a + O = O + a = a$.
3. For any $a \in G$ there exists an opposite element b such that $a + b = O$. Which can be written as $a + (-a) = O$.

The relationship between the security level and key size of ECC, compared to RSA, is not linear, so ECC scales much better. Also, thanks to the significantly shorter key, ECC is suitable for use in systems where execution time and the amount of used memory are critical. Also, there is work that shows how much water can be boiled with the energy needed to hack an algorithm with a certain key length (Table 2) [4].

In modern cryptography, two classes of encryption algorithms are distinguished: asymmetric and symmetric. Each class has its advantages and disadvantages, but the best result can be obtained from a combination of these algorithms.

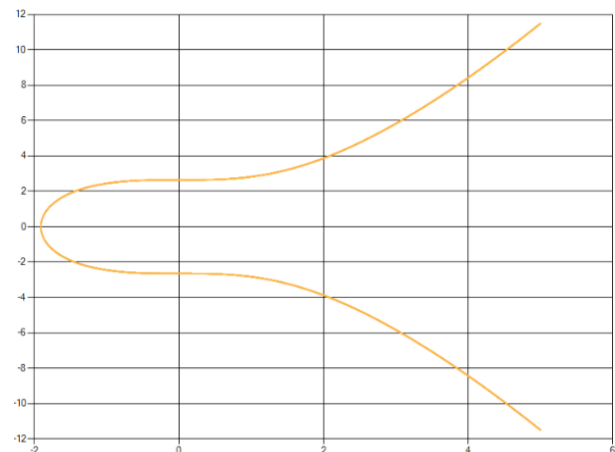


Fig. 1. Elliptic curve when $a = 0, b = 7$

If the commutativity condition $a + b = b + a$ is fulfilled, then such a group is abelian [5].

Let us define group G for the set of points of the elliptic curve. We define the binary operation "+" according to the following rule: the sum of three arbitrary, aligned non-zero elements $P, Q,$ and R of the set G is equal to O [6 – 8]:

$$P + Q + R = O, \quad (2)$$

where O – point at infinity or ideal point.

The element opposite to P is the element symmetrical about the x-axis ($-P$).

Since the binary operation is defined for any elements, satisfying the condition, it can be proved that:

$$P + (Q + R) = (P + Q) + R = Q + R + P = O$$

Therefore, this binary operation has the property of associativity and commutativity. An abelian group is obtained.

Considering the properties of the group, the sum of two points can be rewritten in the following form:

$$P + Q = -R. \tag{3}$$

It should be noted that any straight line crossing the elliptic curve intersects it in one, two, or three points (Fig. 2). Vertical and tangent lines cross the curve at two points (Fig. 3, 4).

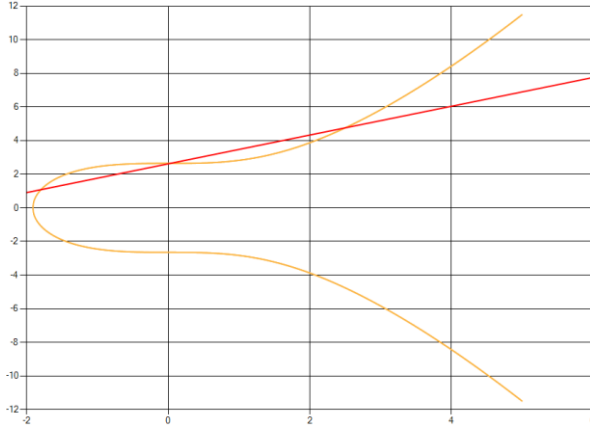


Fig. 2. Intersection of the curve at 3 points

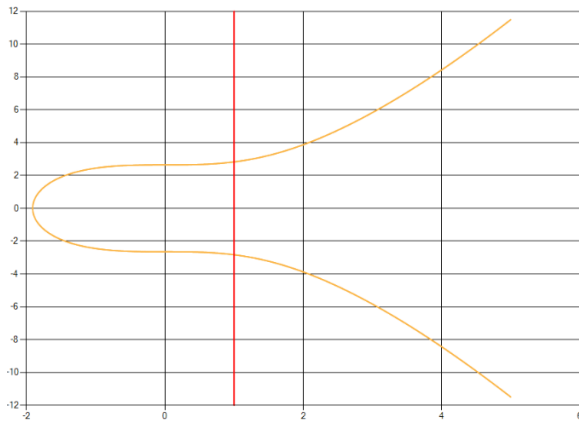


Fig. 3. Intersection at 2 points

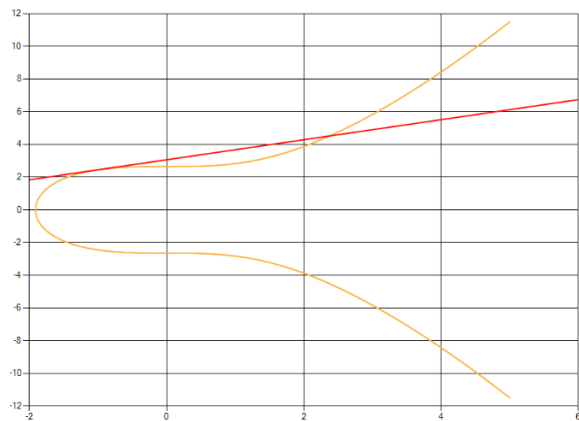


Fig. 4. The tangent line intersects the curve at 2 points

So, we have an algorithm for finding the geometric sum of two nonzero points P, Q (Fig. 5).

Now it is possible to find the sum of two points on the graph (Fig. 6), but it is necessary to determine the algebraic sum for the numerical calculation of the coordinates of point $(-R)$.

If $P \neq Q$ or $x_P \neq x_Q$, then a slope λ of the line, crossing two points is:

$$\lambda = \frac{y_Q - y_P}{x_Q - x_P}.$$

This line intersects the curve at a point $R(x_R; y_R)$:

$$x_R = \lambda^2 - x_P - x_Q. \tag{4}$$

$$y_R = \lambda(x_R - x_P) + y_P = \lambda(x_R - x_Q) + y_Q. \tag{5}$$

Then,

$$-R(x_R; y_R) = R(x_R; -y_R).$$

So, the equation (5) can be rewritten as:

$$-y_R = \lambda(x_P - x_R) - y_P = \lambda(x_Q - x_R) - y_Q. \tag{6}$$

For the case $P = Q$, the slope λ is found as the first derivative of the curve:

$$\lambda = y' = \frac{\sqrt{x^3 + ax + b}'}{2\sqrt{x^3 + ax + b}} = \frac{3x^2 + a}{2\sqrt{x^3 + ax + b}}$$

or

$$\lambda = y'_P = \frac{3x_P^2 + a}{2y_P}.$$

An algorithm for the algebraic sum of two non-zero points of the curve has been obtained [9].

For further calculations, it is necessary to define the scalar multiplication operation:

$$nP = \sum_{i=1}^n P.$$

But with large n , the calculations take a lot of time – the time complexity of the algorithm is $O(n)$. One of the algorithms for solving this problem is the double and add algorithm. It is best to describe this algorithm using an example. Let $n = 170$, which in binary equals to $n = 10101010$ or:

$$170 = 1 * 2^7 + 0 * 2^6 + 1 * 2^5 + 0 * 2^4 + 1 * 2^3 + 0 * 2^2 + 1 * 2^1 + 0 * 2^0 = 2^7 + 2^5 + 2^3 + 2^1.$$

Then nP can be written as follows:

$$nP = 170P = 2^7P + 2^5P + 2^3P + 2^1P.$$

So, there are the following steps:

- 1) double P to get 2^1P ;
- 2) double the result two more times to get 2^3P and add it to 2^1P ;
- 3) double 2^3P twice to get 2^5P and add to the previous sum;
- 4) similarly get 2^7P and add it to the previous sum.

As a result, it is necessary to perform 7 doubling operations and 3 addition operations. Such an algorithm is much faster and has a complexity of $O(\log_2 n)$.

The peculiarity of the specified multiplication operation is that by knowing n and P , it is easy to find $nP = P'$, but to find n by P and P' , it is necessary to solve a complex problem of discrete logarithms. No algorithm with polynomial time complexity has been found to solve this problem on a classical computer.

Before that, we dealt with curves defined on the set of real numbers R , but for the further implementation of the cryptographic algorithm, it is necessary to define curves on finite fields with integer points.

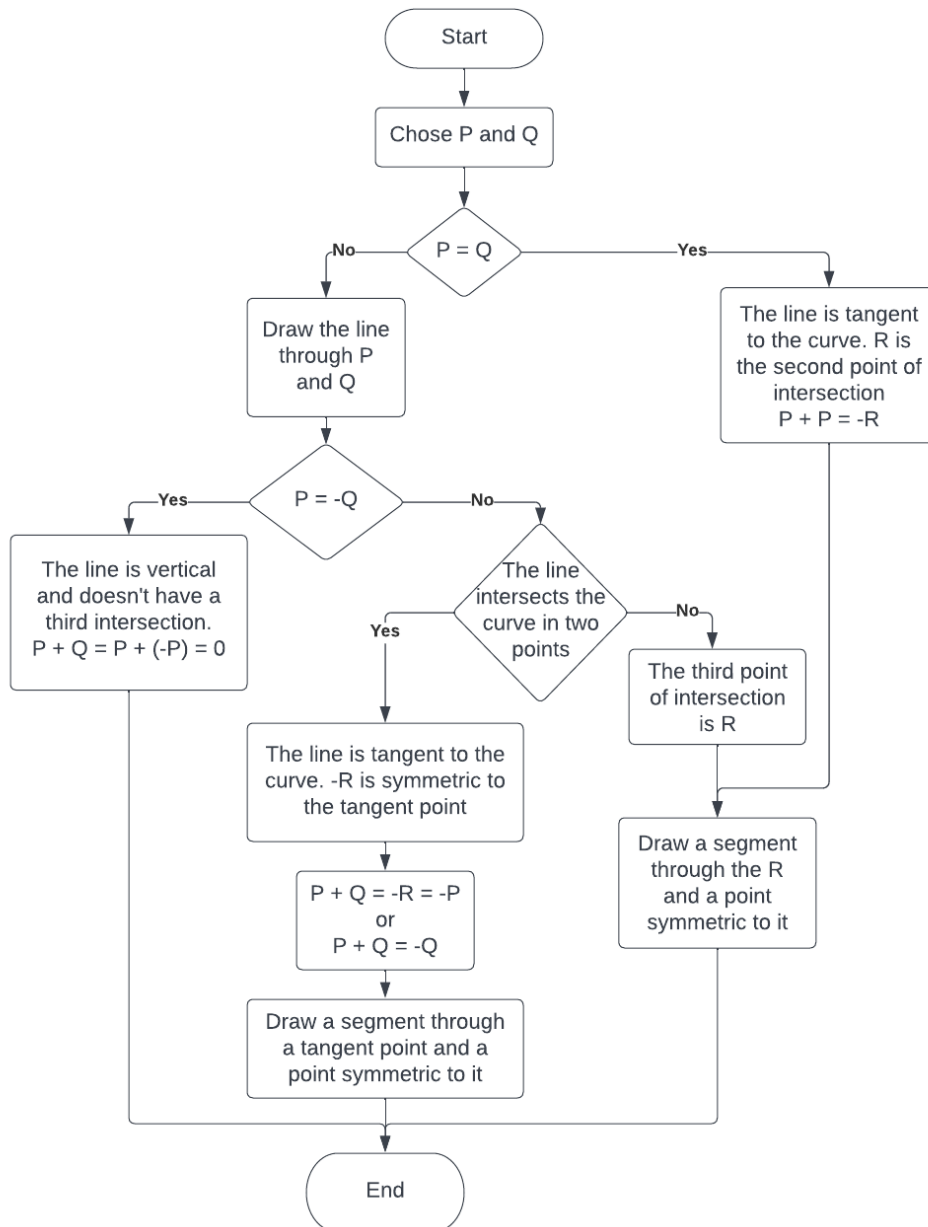


Fig. 5. Algorithm for finding the geometric sum of two points

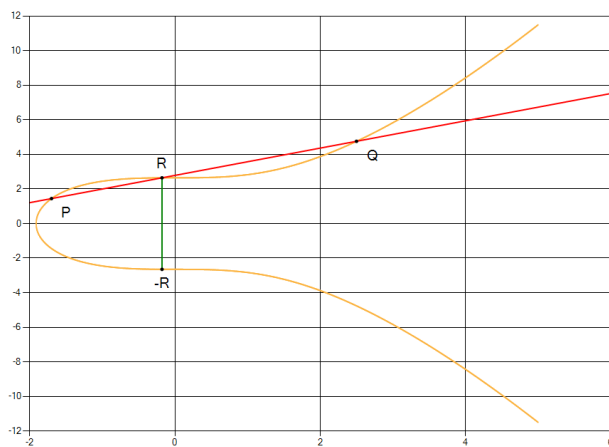


Fig. 6. Geometric sum of points

A finite field consists of a finite set of objects called field elements together with the description of two binary operations — addition and multiplication.

A finite field containing q field elements only if q is a power of a prime number, and furthermore that for each such q there is precisely one finite field.

The finite field containing q elements is denoted by F_q .

In cryptography, it is usually distinguished the prime finite field F_p containing p elements, and the characteristic 2 finite field F_{2^m} containing 2^m elements, where $m \geq 1$. In this work considered the prime finite field. F_p is a set of integers:

$$F_p = \{0, 1, \dots, p - 1\}.$$

Binary operations are defined as follows:

- Addition: If $a, b \in F_p$, then $a + b = r$ in F_p , where $r \in [0, p - 1]$ is the remainder when the integer $a + b$ is divided by p . This is known as addition modulo p and written $a + b \equiv r \pmod{p}$.

- Multiplication: If $a, b \in F_p$, then $ab = s$ in F_p , where $s \in [0, p - 1]$ is the remainder when the integer

ab is divided by p . This is known as multiplication modulo p and written $ab \equiv s(mod p)$.

There is no exactly operation for subtraction and division, but we can describe additive and multiplicative inverses:

- Additive inverse: If $a \in F_p$, then the additive inverse $(-a)$ of a in F_p is the unique solution to the equation $a + x \equiv 0(mod p)$.

- Multiplicative inverse: If $a \in F_p, a \neq 0$, then the multiplicative inverse a^{-1} of a in F_p is the unique solution to the equation $ax \equiv 1(mod p)$. Which can be easily calculated by extended Euclidean algorithm.

Therefore, subtraction and division operations accordingly can be written as:

$$a - b \equiv a + (-b) (mod p);$$

$$\frac{a}{b} \equiv a(b^{-1}) (mod p).$$

The equation of the curve over prime finite field F_p takes the following form:

$$y^2 \equiv x^3 + ax + b (mod p), \tag{7}$$

where $4a^3 + 27b^2 \neq 0$.

Graphically, the curve $y^2 \equiv x^3 + 7 (mod 127)$ looks as follows (Fig. 7). The symmetry is preserved about the line $y = \frac{p}{2}$.

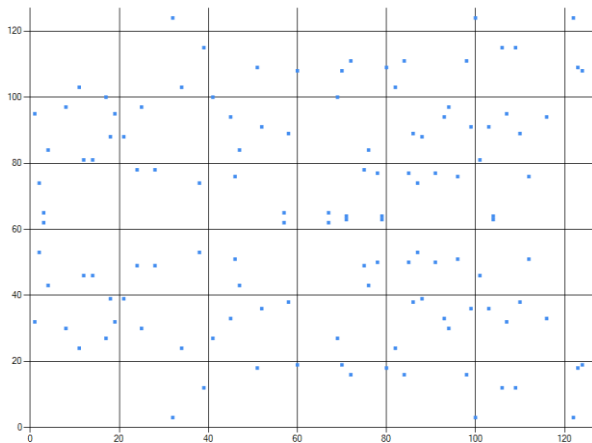


Fig. 7. Elliptic curve on the finite field F_{127}

We are still able to find geometric sum of points on the graph (Fig. 8).

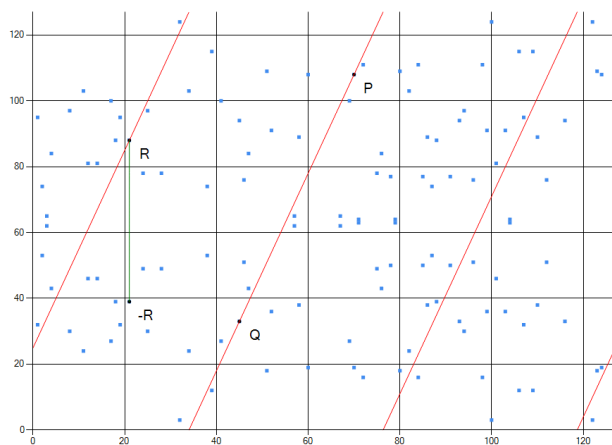


Fig. 8. Sum of points P, Q of curve

The method is similar to the one described above with the difference that the line drawn through points P and Q "repeats" itself on the plane.

Summarizing the above, we can make changes to the equations of point R :

$$x_R \equiv \lambda^2 - x_P - x_Q (mod p); \tag{8}$$

$$-y_R \equiv \lambda(x_P - x_R) - y_P (mod p), \tag{9}$$

where:

$$\lambda \equiv \begin{cases} (y_Q - y_P)(x_Q - x_P)^{-1} (mod p), & \text{if } x_P \neq x_Q \\ (3x_P^2 + a)(2y_P)^{-1} (mod p), & \text{if } x_P = x_Q \end{cases}$$

Elliptic curve domain parameters over F_p precisely specify an elliptic curve and base point. This is necessary to precisely define public-key cryptographic schemes based on ECC.

Elliptic curve domain parameters over F_p are a sextuple:

$$T = (p, a, b, G, n, h),$$

where p – prime integer, specifying the finite field F_p .

a, b – parameters of a curve.

G – a base point.

n – order of G .

h – cofactor of the subgroup.

This information is sufficient for rough implementation of algorithms on elliptic curves [10].

Results

The selection of curve parameters is a very important stage.

There are a number of vulnerable curves that cannot be used in cryptographic problems. But, elliptic curves with recommended parameters were defined and standardized.

The curve of the secp256k1 standard [11] with the following parameters was used in this work:

$$T = (p, a, b, G, n, h),$$

where:

$$p = 2^{256} - 2^{32} - 2^9 - 2^8 - 2^7 - 2^6 - 2^4 - 1;$$

$$a = 0;$$

$$b = 7;$$

$G = 04\ 79BE667E\ F9DCBBAC\ 55A06295$
 $CE870B07\ 029BFCDB\ 2DCE28D9\ 59F2815B$
 $16F81798\ 483ADA77\ 26A3C465$
 $5DA4FBFC\ 0E1108A8\ FD17B448$
 $A6855419\ 9C47D08F\ FB10D4B8;$

$n = \text{FFFFFFFF FFFFFFFF FFFFFFFF}$
 $\text{FFFFFFFFE BAAEDCE6 AF48A03B}$
 $\text{BFD25E8C D0364141};$

$$h = 1.$$

Knowing the parameters of the elliptic curve, we can implement any algorithm on elliptic curves. Many classical cryptographic algorithms have analogs on elliptic curves.

The most popular of them are the Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA) – an algorithm that allows authenticating the identity of the sender, and

the Elliptic-curve Diffie–Hellman (ECDH) – which is a complete analog of the private key exchange algorithm.

But in this work, we are interested in the asynchronous encryption algorithm, which is written as follows:

1. User *A* chooses a random private key $d_A \in [1, n - 1]$.

2. Based on the private key d_A , the user generates the public key $P_A = d_A G$ and transfers it to user *B*.

3. User *B* similarly finds his key pair d_B, P_B and gives user *A* his public key P_B .

4. User *A* chooses the plaintext m that he wants to encrypt and finds the point of the curve $P_m(m; y_m)$.

5. User *A* chooses a random number $k \in [1, n - 1]$ and uses the public key P_B to encrypt the message, then send the result to user *B* as a pair of points:

$$G_m = \{kG, P_m + kP_B\}. \tag{10}$$

6. User *B* decrypts the message using his private key d_B :

$$(P_m + kP_B) - d_B kG = P_m. \tag{11}$$

or,

$$P_m + k(d_B G) - d_B kG = P_m. \tag{12}$$

Since the message is encoded by a point on the curve, it can be represented as an arbitrary number $m \in [1, n - 1]$. In this work, the bit length of the key is 256 bits, so it is possible to encrypt a message up to 32 bytes long at one time.

The ECC algorithm was implemented by using the programming language C#. There was created a console server and a website in case to demonstrate the algorithm at work. The website was created by using the ASP.NET framework [12]. Also, the Microsoft SQL Express database was created, which contains accounts of registered users and their access levels. User passwords are stored in a hashed form in the database to protect them in case of data leakage.

This software can be used to build a secure system in the company. All computers can be connected to a local network with a separate computer on which the site is hosted, so there is no need for an expensive server room. The server can be located anywhere on the Internet. Since computers are connected to a local network and connected to the Internet through a router, the structure of the network is not visible from the outside. Connection to the server is only possible through the website, and only registered and authorized users have access to the information.

For demonstration purposes, a five-level system of access mediation was created.

But this can be changed in the database with administrator rights. An example of partial filling of the database is shown in Fig. 9.

AccountId	Login	Password
1	admin	8c6976e5b5410415bde908bd4dee15...
2	ceo	618402424220c92bcb61bd07148525...
3	chiefaccountant	1c200f7054544e609ca2ad667201abe...
4	engineer 1	488acff6c8256dbe92a4860b8251c99...

Fig. 9. Example of filling the database

Registration of new users is performed by the administrator. Registered users can log in using their login and password. Authorized users have access to data depending on their access level and can view any available files, download them from the server, and upload new files to the server.

The authorization form is shown in Fig. 10.

Fig. 10. Authorization form

The list of all available files is displayed to the authorized user, depending on their access level (Fig. 11, 12). The server records all user actions (Fig. 13).

Name	Onwer	Date	Size	Extension	Download
Conference	chiefaccountant	12.11.2022 17:49:13	40 B	.txt	Download
New document	engineer 1	13.11.2022 12:05:18	0 B	.txt	Download
Table	engineer 3	13.11.2022 16:19:38	6 KB	.XLSX	Download
Presentation	ceo	13.11.2022 19:53:35	33 KB	.PPTX	Download
Report	ceo	13.11.2022 19:53:41	11 KB	.DOCX	Download
Spreadsheet	security 1	14.11.2022 0:26:07	3 KB	.sta	Download

Fig. 11. List of files available to a user with access level 5

Name	Onwer	Date	Size	Extension	Download
New document	engineer 1	13.11.2022 12:05:18	0 B	.txt	Download
Table	engineer 3	13.11.2022 16:19:38	6 KB	.XLSX	Download

Fig. 12. List of files available to a user with access level 2

```
127.0.0.1:12128: connected
127.0.0.1:12128: user admin logged in
127.0.0.1:12128: files listed
127.0.0.1:12128: user engineer 1 logged in
127.0.0.1:12128: files listed
```

Fig. 13. Log of user actions

The algorithm for working with the server is as follows:

1. When the website is initialized, the connection to the server and the generation of encryption keys are performed.

2. The server and the website exchange public keys over an insecure channel. After this stage, data exchange goes in a protected form.

3. The user enters the authorization data, which are sent in encrypted form.

4. The server decodes the message and compares the user data with the data in the database. If the user is found, the server determines their access level and sends

an authorization confirmation to the user. Otherwise, if the entered data is not valid, the authorization request is rejected, return to point 3.

5. The user sends a request to display the list of available files.

6. The server returns to the user information about all files with an access level equal to or lower than the user's access level.

7. The user selects the file and confirms its sending. The file is split into 32-byte fragments and sent to the server as an encrypted stream.

8. The server receives information about the file, creates it in its own file system, and writes the decoded stream of bytes to this file.

9. The user sends a request to download a file from the server.

10. The server sends the file to the user in the form of an encrypted stream.

11. The user receives the file stream, decrypts it, and saves it to a file on his own system.

The implemented asynchronous encryption algorithm works stably for any data of arbitrary size but is expectedly very slow. And such factors as the execution of a request to the database, data transfer via the Internet, and insufficiently optimized implementation

of the algorithm further reduce its speed. In this example, with an Internet connection speed of ~90 Mbit/s, the speed of file transfer by this algorithm was ~2 KB/s.

Conclusions

In this work were considered the main principles of building a secure system. Different types of cryptographic algorithms were described. Compared two asymmetric algorithms – RSA and ECC. The basics of cryptography on elliptic curves have been described, and the encryption algorithm on elliptic curves is implemented.

A demonstration software has been created, which includes cryptographic and organizational measures for building a secure system. Experiments show that such an algorithm is very slow (~2 KB/s), which makes it inapplicable when transferring large files. This can be partially resolved by analyzing the code and identifying weaknesses in the implementation of the algorithm. But considering that the algorithm is complex and requires a lot of calculations, it still will be slow. That is why it is more efficient to use a hybrid encryption algorithm. For example, make an exchange of a private key using ECDH, and then use this key to encrypt data with any modern symmetric algorithm, for example, AES.

REFERENCES

1. В. О. Хорошко, М. В. Капустян (2010). Захист інформації. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. <https://esu.com.ua/article-15872>
2. Bellare, Mihir; Rogaway, Phillip (2005). Introduction to Modern Cryptography. University of California at Davis.
3. Maletsky K. (2020). RSA vs. ECC Comparison for Embedded Systems. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00003442A.pdf>
4. Arjen K. Lenstra, Thorsten Kleinjung, and Emmanuel Thome (2013). Universal security from bits and mips to pools, lakes – and beyond. Cryptology ePrint Archive, Paper 2013/635. <https://eprint.iacr.org/2013/635>
5. Joseph J. Rotman (1995). An Introduction to the Theory of Groups. Fourth Edition. Springer-Verlag New York, Inc.
6. Chernova, G., & Khalimov, P. (2021). Mutation testing of access control policies. *Advanced Information Systems*, 5(1), 118–122. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.17>
7. Mozhaev, O., Kuchuk, H., Kuchuk, N., Mykhailo, M., Lohvynenko, M. (2017), “Multiservice network security metric”, 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017 – Proceedings, pp. 133–136, DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020083>
8. Klimushin, P., Solianyk, T., Kolisnyk, T., & Mozhaev, O. (2021). Potential application of hardware protected symmetric authentication microcircuits to ensure the security of internet of things. *Advanced Information Systems*, 5(3), 103–111. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.14>
9. Atkin, A. O. L. and Morain, F. (1993). Elliptic Curves and Primality Proving. American Mathematical Society.
10. Daniel R. L. Brown (2009). SEC 1: Elliptic Curve Cryptography. <https://www.secg.org/sec1-v2.pdf>
11. Daniel R. L. Brown (2010). SEC 2: Recommended Elliptic Curve Domain Parameters. <https://www.secg.org/sec2-v2.pdf>
12. Daniel R., Rick A., and Shaun L. (2022). Overview of ASP.NET Core. <https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/introduction-to-aspnet-core?view=aspnetcore-7.0>

Received (Надійшла) 19.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.03.2023

Особливості реалізації алгоритму асиметричного шифрування на еліптичних кривих

Г. В. Головка, М. С. Калинович

Анотація. Сучасний світ нерозривно пов'язаний з інформаційними технологіями. З кожним роком Інтернет розширюється, створюються тисячі сайтів, які надають різноманітні послуги. Завдяки стабільному Інтернет-з'єднанню можна вирішити більшість життєвих проблем, не виходячи з дому – від замовлення обіду до отримання державних послуг. В час, коли через пандемію навчальні заклади та бізнес змушені були перейти на дистанційну форму роботи, питання захисту інформації є актуальним як ніколи. Існує багато криптографічних алгоритмів, які десятиліттями захищали інформацію в Інтернеті, але зі зростанням обчислювальної потужності зростають і вимоги до таких алгоритмів. Деякі з них не впоралися з викликом часу і більше не використовуються. Тому виникає потреба в розробці нових алгоритмів, які використовують більш складні математичні принципи та забезпечують вищий рівень безпеки. Існує цілий клас алгоритмів, які використовують принципи еліптичних кривих для забезпечення більшої безпеки з відносно меншим використанням системних ресурсів.

Ключові слова: криптографія, криптографія з відкритим ключем, ECC, RSA, ASP.NET, кібербезпека, шифрування.

Г. С. Іващенко, В. О. Понамарьов, В. О. Холєв

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

КОРОТКОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ MLP ТА LSTM

Анотація. **Актуальність.** Рішення завдання прогнозування відіграє важливу роль у процесах стратегічного планування та оперативного управління у різних сферах господарчої діяльності. Формою прогнозування є прогнозування часових рядів, при якому актуальною проблемою залишається вибір доцільного методу серед сучасних засобів обчислювального інтелекту, таких як штучні нейронні мережі. Проблема вибору обумовлена великою кількістю параметрів та налаштувань, які залежать від особливостей прогнозованого часового ряду, та суттєво впливають на якість отриманого прогнозу. **Метою даної роботи** є аналіз методів короткострокового прогнозування нестационарних часових рядів з використанням моделей штучних нейронних мереж, таких як багатошаровий перцептрон та довга короткострокова пам'ять. **Об'єктом дослідження** є процес прогнозування часових рядів. **Предметом дослідження** є використання моделей штучних нейронних мереж для короткострокового прогнозування. **Результати.** Експериментальні дослідження показали, що середня помилка при прогнозуванні за допомогою запропонованих засобів на 2-6% нижче у порівнянні з використанням поширених традиційних моделей. **Висновок.** Отримані результати підтверджують перевагу використання моделей MLP та LSTM перед прогнозуванням на основі методів, обраних для аналізу у M3-Competition.

Ключові слова: прогнозування часових рядів, обчислювальний інтелект, штучна нейронна мережа, багатошаровий перцептрон, довга короткострокова пам'ять, M3-Competition.

Вступ

Завдання прогнозування зустрічається практично у будь-яких предметних областях та галузях діяльності. Поширене використання прогнозування у економіці, наприклад, для визначення майбутнього обсягу продажу товарів та зміни цінової політики, виходячи з припущеної зміни попиту. З урахуванням прогнозів щодо майбутнього розвитку процесів та подій можна гнучкіше планувати діяльність підприємств та приймати виважені управлінські рішення.

Окремим випадком завдання прогнозування є прогнозування часових рядів, як однієї з популярних форм представлення інформації о процесах реального світу. Значення параметра, що описують зміни у предметній області, фіксуються через певні часові інтервали та утворюють часовий ряд. У такому випадку прогноз є припущенням щодо майбутніх значень часового ряду на основі наявних даних. Наприклад, підприємства у процесі своєї діяльності накопичують великий обсяг інформації, що може бути представлена у вигляді часових рядів та використана для отримання прогнозу щодо подальших перспектив розвитку бізнесу.

При вирішенні завдань прогнозування часових рядів широкою популярністю набуло використання статистичних методів та підходів на основі засобів обчислювального інтелекту [1, 2].

Частина існуючих моделей та відповідних методів використовуються на окремих етапах процесу прогнозування, таких як підготовка вихідних даних, обробка присутніх у реальних даних викривлень та інших. Результат прогнозування часового ряду залежить від багатьох параметрів, таких як обсяг та достовірність необхідної початкової інформації, урахування можливості зміни середовища, в якому протікає процес, доступність необхідних обчислювальних засобів [3, 4].

Проблема вибору методу прогнозування часових рядів широко представлена у сучасних наукових роботах. Особливе місце займають штучні нейронні мережі (ШНМ). На відміну від багатьох статистичних методів, нейронні мережі більш стійкі до зашумлених даних і здатні використовувати необмежену кількість незалежних змінних.

У дослідженні [5] проведено емпіричне порівняння використання засобів обчислювального інтелекту, зокрема, методу k-ближчих сусідів, і окрема увага приділена аналізу моделей ШНМ, таких як багатошаровий перцептрон (MLP), RBF, узагальнено-регресійні ШНМ, ШНМ на основі ядерної регресії та регресії гаусівського процесу. Для експериментальних досліджень були обрані часові ряди щомісячних даних з M3-Competition [6]. Найкращі результати серед розглянутих засобів показали багатошаровий перцептрон та штучна нейронна мережа на основі регресії гаусівського процесу.

У [7] обґрунтовано застосування багатошарового перцептрон для прогнозування часових рядів розповсюдження захворювання COVID-19.

Емпіричні дослідження, описані у [8], показують, що алгоритми прогнозування на основі ШНМ глибокого навчання, такі як модель довгої короткострокової пам'яті (LSTM), перевершують традиційні підходи, які засновані на моделі ARIMA.

Дослідження [9] обґрунтовує використання моделей MLP та LSTM, доводячи, що вони демонструють найкращу ефективність при прогнозуванні нестационарних рядів на один крок вперед.

Виходячи з аналізу сучасних досліджень і публікацій можна зробити висновок, що завдання прогнозування за допомогою моделей ШНМ є актуальним, і тому доцільним є дослідження ефективності використання популярних моделей, таких як MLP та LSTM, при прогнозуванні часових рядів з M3-Competition.

Метою цієї роботи є аналіз методів короткострокового прогнозування нестационарних часових рядів на основі засобів обчислювального інтелекту.

Постановка завдання

Часовий ряд представлений вектором, який відображає значення, що характеризують протікання якогось процесу протягом останніх N інтервалів часу, $x_t = (x_{t-N}, x_{t-N+1}, x_{t-i}, \dots, x_{t-2}, x_{t-1})$, де t – мітка поточного часу, $0 \leq t \leq N$.

Ряд, що залишається у рівновазі щодо постійного середнього рівня є стаціонарним [10]. Відповідність вхідних даних до умови стаціонарності дозволяє отримати точніші дані прогнозу, на відміну від прогнозування нестационарних часових рядів, які є більш поширеними у економіці і тому проблема прогнозування саме нестационарних рядів є більш актуальною [10].

Короткостроковість визначається значенням горизонту прогнозування. Горизонт прогнозування – це часовий інтервал, в межах якого прогноз виконується із заданою точністю [11, 12].

Необхідно прогнозувати майбутні значення у нестационарних часових рядах, наявних у M3-Competition, з значеннями горизонту прогнозування, відповідними до представлених у [6] результатів. Дослідження передбачає використання моделей штучних нейронних мереж, таких як багатошаровий перцептрон та довга короткострокова пам'ять та порівняння отриманих результатів з результатами прогнозування в M3-Competition.

Основна частина

Багато з використовуваних підходів до прогнозування побудовані на невеликій кількості моделей, та відрізняються окремими прийомами та послідовністю їх застосування.

Використовувані у роботі моделі багатошарового перцептрон та довгої короткострокової пам'яті мають один прихований шар вузлів та вихідний шар, який використовується для отримання результатів прогнозування. Однією з проблем використання моделей є підготовка даних для створення навчальної, тестової та контрольної вибірок.

Моделі MLP та LSTM відображають послідовність минулих спостережень, у якості вхідних даних, у вихідне значення. Таким чином, послідовність спостережень має бути перетворена на кілька прикладів, на яких модель може навчатися.

Звичайна послідовність вихідних даних у випадку використання часового ряду має вигляд $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$. Для подальшого використання при навчанні ШНМ таку вихідну послідовність необхідно розділити для створення навчальної вибірки на кілька шаблонів введення та виведення, званих зразками, де перші значення часового ряду використовуються як вхідні дані, а наступне значення (чи декілька значень, залежно від горизонту прогнозування) використовується як вихідні дані для однокрокового (чи багатокрокового) прогнозування.

Розділена послідовність має вигляд:

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ x_4 & x_5 & \dots & x_N \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Значення вхідної змінної може бути числовим або категоріальним і може набувати кількох значень. Усі вони повинні бути нормовані та приймати значення в діапазоні від нуля до одиниці. Нормалізацію значень можна виконати за допомогою наступного виразу:

$$x_t = \frac{0.1 - 0.9}{x_{\min} - x_{\max}} x_t + \frac{0.9 * x_{\min} - 0.1 * x_{\max}}{x_{\min} - x_{\max}}, \quad (2)$$

де x_{\min} , x_{\max} мінімальне та максимальне значення вхідних значень.

Використана модель навчання з вчителем, приклади навчальної вибірки, виходячи з обсягу наявних у M3-Competition часових рядів, містять по вісім значень часового ряду (вхідні значення для ШНМ) та по одному коректному значенню результату, яке може бути використане при корегуванні ваг зв'язків між вузлами ШНМ у процесі навчання. Таким чином, навчання виконуються шляхом покрокового прогнозу на підставі восьми попередніх значень часового ряду.

Модель MLP складається із вхідного, прихованого та вихідного шарів. Кожен шар складається з деякої множини вузлів. Вага зв'язків між вузлами є позитивним числом, якщо один вузол стимулює інший або негативним, якщо один вузол пригнічує інший. Вузли з вищими значеннями ваги мають більший вплив інші вузли [13].

Для прогнозу з використанням багатошарового перцептрон використовується мережа з n вузлами на вході (дорівнює кількості значень часового ряду, на основі яких будується прогноз), m внутрішніми вузлами та одним вузлом на виході (у випадку прогнозування на один крок уперед) [14].

На вході кожного внутрішнього вузла значення стимулу дорівнює:

$$net_j(x_t) = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_{t-1} + b_j, \quad (3)$$

де w_{ij} – вага між вузлом i та вузлом j , b_j – зміщення внутрішнього вузла i .

На виході внутрішнього вузла значення стимулу дорівнює:

$$y_j = f \left(\sum_{i=1}^n w_{ij}^h x + b_j \right), \quad (4)$$

де w_{ij}^h – вага між вузлом i та вузлом j , b_j – зміщення внутрішнього вузла i .

На вході вихідного вузла значення стимулу дорівнює:

$$net^o(x_t) = \sum_{i=1}^n w_i^o x_{t-1} + b^o, \quad (5)$$

де w_i^o – вага між вузлом i та вузлом j , b^o – зміщення внутрішнього вузла i .

На виході вихідного вузла значення стимулу дорівнює:

$$y_t = f \left(\sum_{i=1}^n w_i^o * f \left(\sum_{j=1}^m w_{jk} + b_j \right) + b^o \right), \quad (6)$$

де w_i^o – вага між вузлом i та вузлом j , w_{jk} – вага між вузлом i та вихідним вузлом, b_j – зміщення внутрішнього вузла i , b^o – зміщення вихідного вузла.

Нейрони у моделі LSTM складають клітини пам'яті, блок входу, блок виходу, вхідний шлюз та вихідний шлюз [15].

Для прогнозу з використанням довгої короткострокової пам'яті використовується мережа з n блоків обробки та m входів [16].

Блок входу поєднує поточний вхід та вихід цього блоку в останній ітерації:

$$z^{(t)} = g \left(w_z x^{(t)} + r_z y^{(t-1)} + b_z \right), \quad (7)$$

де w_z та r_z – вагові коефіцієнти $x^{(t)}$ та $y^{(t-1)}$, b_z – вектор зміщення.

Вхідний шлюз поєднує поточний вхід, вихід цього блоку та значення клітинки пам'яті на останній ітерації:

$$i^{(t)} = \sigma \left(w_i x^{(t)} + r_i y^{(t-1)} + p_i * c^{(t-1)} + b_i \right), \quad (8)$$

де w_i , r_i та p_i – вагові коефіцієнти $x^{(t)}$, $y^{(t-1)}$ та $c^{(t-1)}$, b_i – вектор зміщення.

Значення активації пропускового шлюзу обчислюються на основі поточного входу, виходів та стану клітинки пам'яті:

$$f^{(t)} = \sigma \left(w_f x^{(t)} + r_f y^{(t-1)} + p_f * c^{(t-1)} + b_f \right), \quad (9)$$

де w_f , r_f та p_f – вагові коефіцієнти для $x^{(t)}$, $y^{(t-1)}$ та $c^{(t-1)}$, b_f – вектор зміщення.

Значення клітинки пам'яті поєднує значення вхідного блоку, вхідного шлюзу, та значення пропускового шлюзу із попереднім значенням клітинки пам'яті:

$$c^{(t)} = z^{(t)} * i^{(t)} + c^{(t-1)} * f^{(t)}. \quad (10)$$

Вихідний шлюз поєднує поточний вхід, вихід цього блоку та значення клітинки пам'яті на останній ітерації:

$$o^{(t)} = \sigma \left(w_o x^{(t)} + r_o y^{(t-1)} + p_o * c^{(t-1)} + b_o \right), \quad (11)$$

де w_o , r_o та p_o – вагові коефіцієнти для $x^{(t)}$, $y^{(t-1)}$ та $c^{(t-1)}$, b_o – вектор зміщення.

Блок виходу поєднує поточне значення клітинки пам'яті та значення вихідного шлюзу:

$$y^{(t)} = g \left(c^{(t)} \right) * o^{(t)}. \quad (12)$$

Щоб знайти оптимальні ваги для використовуваних моделей, використовується алгоритм зворотного розповсюдження помилок.

Для функції активності f' виходом є:

$$o_j = f' \left(net_j \right), \quad (13)$$

Для похідної f' отримуємо:

$$\frac{\partial o_j}{\partial net_j} = f' \left(net_j \right); \quad (14)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{-\alpha e^{-\alpha x}}{1 + e^{-\alpha x}} = \alpha f (1 - f); \quad (15)$$

$$\frac{\partial o_i}{\partial net_i} = \frac{-e^{-\alpha net_i}}{\left(1 + e^{-\alpha net_i} \right)^2} = o_i (1 - o_i). \quad (16)$$

Таким чином, помилка в мережі на вихідному вузлу розраховується таким чином:

$$\delta_j = \left(t_j - o_j \right) * \alpha * o_j * \left(1 - o_j \right). \quad (17)$$

Для обчислення помилки внутрішнього j шару:

$$\delta_j = o_j * \left(1 - o_j \right) * \sum_k \delta_k w_{jk}, \quad (18)$$

де w_{jk} – вага зв'язку між вузлом внутрішнього шару та вузлом наступного шару.

Нові значення будуть обчислені згідно:

$$w'_{ij} = w'_{ij} + \Delta w_{ij} = w'_{ij} + \eta \delta_j o_i. \quad (19)$$

При проектуванні архітектури нейронної мережі необхідно враховувати, що кількість нейронів у прихованих шарах повинна залежати від обсягу навчальної вибірки.

Кількість прихованих шарів та кількість нейронів вибираються такими, щоб вони утворювали втричі менше зв'язків, ніж кількість навчальних прикладів.

Коефіцієнт навчання η – значення суттєво менше одиниці. Визначення коефіцієнта навчання згідно:

$$\eta = \frac{\max [x] - \min [x]}{N}. \quad (20)$$

Якщо значення η дуже мало, то налаштування вагових коефіцієнтів може займати багато часу для досягнення збіжності. Але великі значення призводять до пропусків глобальних екстремумів та передчасної збіжності.

Для отримання набору вагових коефіцієнтів необхідно виконати такі кроки:

1. Ініціалізація ваг з випадковими значеннями.
2. Для кожного внутрішнього вузла обчислити значення сигналу на вході та виході.
3. Обчислити значення сигналу на вході та виході вихідного вузла.
4. Якщо різниця між отриманим значенням сигналу у вихідному вузлі і реальним значенням не більше допустимого, то на цьому закінчити, інакше перейти до кроку 5.
5. Обчислити помилку та розрахувати нові вагові коефіцієнти.
6. Скоригувати величину відповідно до результату перевірки: чи збігається напрям змін прогнозованих значень з реальними значеннями.
7. Повторити кроки 2, 3, 4, 5, 6.

Обсяг навчальної вибірки залежить кількості входів штучної нейронної мережі та коефіцієнтів навчання.

Результати порівняльного аналізу

В ході експериментальних досліджень виконано короткострокове прогнозування на вісім кроків уперед для часових рядів, що використовуються в M3-Competition та проведено порівняння отриманих даних з наявними результатами прогнозування за допомогою Vox-Jenkins, ARARMA, ForecastPro, Auto-ANN, SMARTFCS, RBF.

Прогнозування за допомогою розглянутих MLP та LSTM відбувалося по одному кроку вперед, приймаючи результати минулого кроку як частину вихідних даних.

Графічне відображення результатів прогнозування наведено на рис. 1.

Для оцінки короткострокового прогнозу часового ряду використовується значення середньої абсолютної помилки (MAE), та, оскільки для оцінки якості отриманого прогнозу доцільним є використання критеріїв, що дозволяють оцінити помилку у відсотковому відношенні, значення середньої абсолютної помилки у відсотках (MAPE).

Середня абсолютна помилка розраховується за формулою:

$$MAE = \sum_{i=1}^k |y_i - x_i| / k, \quad (21)$$

де y_i – фактичне значення, x_i – прогнозне значення, k – кількість прогнозованих значень.

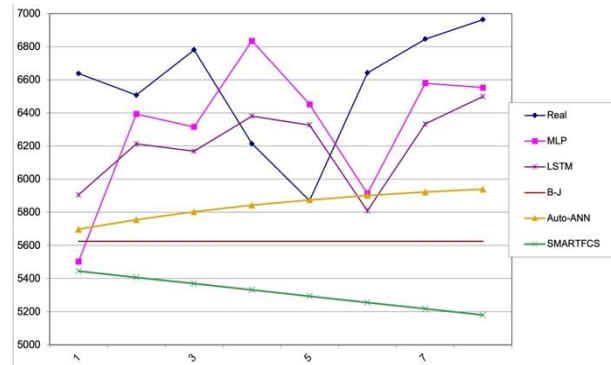


Рис. 1. Результати прогнозування

Середня абсолютна помилка у відсотках розраховується згідно:

$$MAPE = \frac{100\%}{k} \sum_{t=1}^k \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|, \quad (22)$$

де A_t – фактичне значення, F_t – прогнозне значення, k – кількість прогнозованих значень.

Середня абсолютна помилка та середня помилка у відсотках при використанні різних методів короткострокового прогнозування часових рядів наведена у табл. 1. Для аналізу були обрані з M3-Competition ряди різного походження довжиною від 39 до 72 значень. Суттєвого впливу кількості значень прогнозованого часового ряду на ефективність прогнозу не виявлено. Результати прогнозування часових рядів підтверджують суттєву перевагу використання моделей багатошарового перцептронів та довгої короткострокової пам'яті.

Таблиця 1 – Середня абсолютна помилка та середня помилка у відсотках при використанні різних методів короткострокового прогнозування часових рядів

Метод	Критерії	N700, (44)	N800, (44)	N900, (72)	N1000, (52)	N1100, (52)	N1200, (52)	N1300, (39)	N1400, (48)
B-J	MAE	932	353	111	175	402	123	470	232
	MAPE, %	8,3	4,85	1,73	2,54	3,81	0,46	1,63	0,92
ARARMA	MAE	1072	370	203	325	430	91	292	84
	MAPE, %	7,72	9,57	1,87	1,44	4,69	0,73	5,45	1,27
Auto-ANN	MAE	717	810	97	180	484	74	435	127
	MAPE, %	13,98	11,37	2,14	2,57	7,57	1,75	8,53	2,74
ForecastPro	MAE	984	233	109	350	448	43	470	227
	MAPE, %	16,11	11,63	3,93	4,84	7,94	1,3	5,49	0,99
SMARTFCS	MAE	1245	251	87	244	615	39	253	144
	MAPE, %	10,69	20,91	1,87	2,71	9,69	1,05	7,9	1,5
RBF	MAE	919	701	176	185	1056	50	340	228
	MAPE, %	14,77	5,51	2,11	5,2	7,91	0,62	8,54	2,68
MLP	MAE	540	174	89	171	201	51	118	78
	MAPE, %	18,75	7,73	1,7	3,64	10,84	0,56	4,88	1,7
LSTM	MAE	509	273	96	96	267	50	284	107
	MAPE, %	13,77	21,95	3,42	2,77	18,51	0,72	6,29	2,69

Висновки

В роботі досліджено використання моделей багатошарового перцептронів та довгої короткостроков-

ої пам'яті для короткострокового прогнозування нестационарних часових рядів. Проведено порівняння отриманих результатів з наявними результатами прогнозування в M3-Competition.

Досліджувані моделі показали перевагу над засобами, що використовуються для прогнозування часових рядів M3-Competition.

З урахуванням того, що розглянуті ШНМ передбачають отримання прогнозу лише на один крок уперед (мають один нейрон у вихідному шарі), у процесі прогнозування з заданим горизонтом прогнозування послідовно використовувалися дані, які були отримані у якості результату на попередньому кроці, для використання їх на вході ШНМ. Це дозволяє досягти

меншої помилки, ніж при створенні прогнозу відразу на задану кількість значень.

Це також дозволяє забезпечити гнучкість використання ШНМ, оскільки не потребує перебудови архітектури при зміні потрібного горизонту прогнозування.

Середня помилка у відсотках при прогнозуванні часових рядів досліджуваних моделей на 2-6% нижче при порівнянні з використанням традиційних моделей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Iorio C., Frasso G., Ambrosio A. (2016), "Parsimonious time series clustering using P-splines", *Expert Systems with Applications*, № 52, pp. 26-38.
2. Yang J. (2006), "Power System Short-term Load Forecasting: Thesis for Ph.d degree", *Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitat, Darmstadt, Germany*, P. 139.
3. Korablev N.M., Ivaschenko G.S. (2014), "Parallel immune algorithm of short-term forecasting based on model of clonal selection", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, № 2. pp. 73-78, doi: doi.org/10.15588/1607-3274-2014-2-11
4. Ivaschenko G.S., Korablev N.M. (2014), "Time series forecasting on the basis of the case-based reasoning using the models of artificial immune systems", *System technologies*, № 6(95), pp. 43-51, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/st_2014_6_8
5. Ahmed N., Atiya A., Gayar N. (2010), "An Empirical Comparison of Machine Learning Models for Time Series Forecasting", *Econometric Reviews*, № 29, pp. 594-621.
6. Makridakis S. (2000), "The M-3 Competition: Results, Conclusions and Implications", *International Journal of Forecasting*, № 16, pp. 451-476.
7. Borghi P., Zakordonets O., Teixeira J. (2021), "A COVID-19 time series forecasting model based on MLP ANN", *Procedia Computer Science*, № 181, pp. 940-947.
8. Namini S., Tavakoli N., Namin A. (2018), "A Comparison of ARIMA and LSTM in Forecasting Time Series", *17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications*.
9. Cao J., Li Z., Li J. (2019), "Financial time series forecasting model based on CEEMDAN and LSTM", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, № 519, pp. 127-139.
10. Vasily D., Matviychuk A., Datsenko N., Bezkorovainyi V., Azaryan A. (2020), "Machine learning approaches for financial time series forecasting", *Proceedings of the Selected Papers of the Special Edition of International Conference on Monitoring, Modeling & Management of Emergent Economy*, № 2713, Odessa, Ukraine, pp. 434-450.
11. Hemmati A., Abdoos M., Akbar A. (2015), "Short term load forecasting using a hybrid intelligent method", *Knowledge-Based System*, № 76, pp. 139-147.
12. Mohammed A.S., Ivashchenko H., Filimonchuk T., Ivanisenko I., Barkovska O. (2020), "Green Hybrid Models Based on Clonal Selection and Case-based Reasoning for Short-term Time Series Forecasting", *Journal of Green Engineering*, Vol. 10, Issue 5. pp. 2139-2154, available at: <http://www.jgennng.com/volume10-issue5.php>
13. Hamzacebi C., Akay D., Kutay F. (2009), "Comparison of direct and iterative artificial neural network forecast approaches in multi-periodic time series forecasting", *Expert Systems with Applications*, № 36, pp. 3839-3844.
14. Voyant C., Nivet M., Paoli C., Muselli M., Notton G. (2014), "Meteorological time series forecasting based on MLP modelling using heterogeneous transfer functions", *Journal of Physics: Conference Series*, № 574, Madrid, Spain, pp. 28-31.
15. Greff, K., Srivastava, R., Koutnik, J., Steunebrink, B., Schmidhuber, J. (2017), "LSTM: A Search Space Odyssey", *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, № 28, pp. 2222-2232.
16. Su Y., Kuo C. (2019), "On extended long short-term memory and dependent bidirectional recurrent neural network", *Neurocomputing*, № 356, pp. 151-161.

Received (Надійшла) 09.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.03.2023

Short-term of non-stationary time series forecasting using MLP and LSTM models

Heorhii Ivashchenko, Vladyslav Ponamarov, Vladyslav Kholiev

Abstract. Topicality. The solution of the problem of forecasting takes an important role in the processes of strategic planning and operational management in various areas of economic activity. A widespread form of forecasting is time series forecasting, in which the actual problem is the choice of an appropriate method among modern means of computational intelligence, such as artificial neural networks. The problem of choice is due to a large number of parameters and settings that depend on the features of the predicted time series and have a significant impact on the forecast quality. **The goal of this work** is to analyze methods for short-term forecasting of non-stationary time series using artificial neural network models such as multilayer perceptron and long short-term memory. **The object of research** is the process of time series forecasting. **The subject of research** is the use of artificial neural network models for short-term forecasting. **Results.** Experimental research has shown that the average error in forecasting using the proposed tools is 2-6% lower compared to using common traditional models. **Conclusions.** The obtained results confirm the advantage of using the MLP and LSTM models over forecasting based on the methods chosen for the M3-Competition analysis.

Keywords: time series forecasting, computational intelligence, artificial neural network, multilayer perceptron, long short-term memory, M3-Competition

Д. С. Клещ, В. М. Федорченко

Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. Актуальність. Розпізнавання тексту на зображеннях (оптичне розпізнавання символів) — один із напрямків розпізнавання образів, завдання якого полягає у переведенні зображень рукописного, машинного або друкованого тексту в текстові дані, які використовуються для представлення символів на комп'ютері (наприклад, у текстовому редакторі). Розпізнавання тексту на зображеннях є важливим завданням машинного навчання, оскільки це дозволяє організувати зручну взаємодію з даними: редагування, аналіз, пошук слів чи фраз тощо. Тим не менш, створення додатку в цій галузі залишається творчим завданням і вимагає додаткових досліджень у зв'язку зі специфічними вимогами щодо вирішення, швидкодії, надійності розпізнавання та обсягу пам'яті, якими характеризується кожна конкретна задача. **Метою даної роботи** є надання рекомендацій щодо вибору типів нейронних мереж, методів їх навчання в задачах розпізнавання зображень. **Об'єктом дослідження** є процеси розпізнавання зображень. **Предметом дослідження** є методи розпізнавання зображень тексту або символів на основі штучного інтелекту. **Результати.** В роботі були проаналізовані типи нейронних мереж та види їх навчання що притаманні для розв'язання задач розпізнавання рукописних символів. **Висновок.** В даний час на ринку існує досить велика кількість інноваційних компаній, які займаються розпізнаванням зображень із використанням нейромережевих технологій навчання системи. Достеменно відомо, що вони досягли точності розпізнавання зображень в районі 95% при використанні бази даних 10 000 зображень. Проте всі досягнення відносяться до статичних зображень, з динамічними зображеннями ситуація не однозначна. Тому дослідження в галузі розпізнавання зображень за допомогою нейронної мережі ще досліджуються, вона є актуальною зараз.

Ключові слова: нейронна мережа, перцептрон, парадигма var, cnn, rnn, adaptive resonance theory.

Вступ

На сьогоднішній день технологічний та науково-дослідний прогрес охоплює нові горизонти, стрімко прогресуючи. Один із них — це моделювання навколишнього природного світу за допомогою математичних алгоритмів. В даному аспекті існують тривіальні, наприклад, моделювання коливачів моря, і вкрай складні, нетривіальні, багатокомпонентні завдання, наприклад, моделювання функціонування людського мозку. У процесі дослідження цього питання було виділено окреме поняття — нейронна мережа. Нейронна мережа є математичну модель та її здійснення як програмної чи програмно-апаратної реалізації, яка виконано з урахуванням моделювання діяльності біологічних нейронних мереж, якими є мережі нейронів в біологічному організмі. Науковий інтерес до цієї структури виникла тому, що дослідження її моделі дозволяє отримувати інформацію про деяку систему. Тобто подібна модель може мати практичну реалізацію у низці галузей сучасної науки та техніки.

Вибір нейронної мережі залишається актуальним, оскільки різні нейронні мережі підходять для вирішення різних завдань. Залежно від задачі, може знадобитися використовувати різні типи архітектур, такі як нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) для завдань комп'ютерного зору, рекурентні нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN) для завдань обробки послідовностей або пов'язані нейронні мережі (Fully Connected Networks, FCN) для класифікаційних завдань. Також слід враховувати ресурси, які доступні для навчання та запуску нейронної мережі, такі як пам'ять, процесорний час та енергоспоживання, щоб вибрати найбільш відповідну мережу для конкретного завдання. Загалом,

вибір відповідної нейронної мережі залежить від багатьох факторів.

Коротка історія розвитку нейронних мереж

Варто зазначити, що спочатку поняття «нейронна мережа» бере свій початок у роботі американських математиків, нейролінгвістів та нейропсихологів У. Маккалока та У. Піттса (1943 р.), де автори вперше згадують про неї, дають їй визначення та роблять першу спробу побудови моделі нейронної мережі. Вже 1949 р. Д. Хебб пропонує перший алгоритм навчання. Далі була низка досліджень у галузі нейронного навчання, і перші робочі прототипи з'явилися приблизно у 1990–1991 роках. минулого сторіччя. Проте обчислювальних потужностей устаткування на той час не вистачало для досить швидкої роботи нейронних мереж. До 2010 року потужності GPU відеокарт сильно збільшилися і з'явилося поняття програмування безпосередньо на відеокартах, що істотно (в 3–4 рази) збільшило продуктивність комп'ютерів. У 2012 р. нейромережі вперше перемогли на чемпіонаті ImageNet, чим і ознаменувався їхній подальший бурхливий розвиток та поява терміну Deep Learning [1].

У сучасному світі нейронні мережі мають колосальне охоплення, вчені вважають дослідження, що проводяться в галузі вивчення поведінкових особливостей та станів нейронних мереж, вкрай перспективними. Перелік областей, у яких нейронним мережам знайшлося застосування, величезний. Це і розпізнавання і класифікація образів, і прогнозування, і розв'язання апроксимаційних завдань, і деякі аспекти стишення даних, аналізу даних і, звичайно, застосування систем безпеки різного характеру.

Дослідження нейронних мереж сьогодні активно відбувається у наукових спільнотах різних країн. При такому розгляді вона представлена як окремий

випадає ряд методів розпізнавання образів, дискримінантного аналізу, а також методів кластеризації.

Слід також зазначити, що протягом останнього року на стартапи в галузі систем розпізнавання зображень було виділено фінансування більш ніж за попередні 5 років, що говорить про досить велику популярність даного типу розробок на кінцевому ринку.

Приклад кілька актуальних нейронних мереж:

- Google AutoDraw - сервіс, перетворює малюнки від руки на високоякісні кліп-арти;
- Let's Enhance - сервіс, який дозволяє покращувати фотографії та масштабувати їх без втрати якості;
- CaptionBot - онлайн-сервіс компанії Microsoft, який розпізнає об'єкти на зображеннях, що завантажуються користувачем, і за допомогою нейронних мереж описує те, що знаходиться на фото, причому простими людськими словами;
- Colorize - сервіс, який використовує технології штучного інтелекту для розфарбовування чорно-білих фотографій;
- Remove.bg - AI-сервіс, що дозволяє за лічені секунди видалити фон на фотографіях без використання графічних редакторів. Достатньо завантажити зображення - і система автоматично, з використанням алгоритмів штучного інтелекту виділить об'єкти на передньому плані і прибере все зайве.

Застосування нейронних мереж для розпізнавання зображень

Розглянемо стандартні завдання, які вирішуються нейронними мережами у додатку до зображень [2]:

- ідентифікація об'єктів;
- розпізнавання частин об'єктів;
- семантичне визначення меж об'єктів (дозволяє залишати тільки межі об'єктів на картинці);
- семантична сегментація (дозволяє розділяти зображення на різні окремі об'єкти);
- виділення нормалей до поверхні (дозволяє перетворювати двовимірні картини на тривимірні зображення);
- виділення об'єктів уваги (дозволяє визначити те, на що звернула б увагу людина на цьому зображенні).

Варто зазначити, що завдання розпізнавання зображень має яскравий характер, розв'язання цього завдання є складним та неординарним процесом. При виконанні розпізнавання як об'єкта може бути людська особа, техніка, а також безліч інших об'єктів, що характеризуються низкою унікальних ознак, що суттєво ускладнює процес ідентифікації.

У цьому дослідженні буде розглянуто алгоритм створення та навчання розпізнаванню рукописних символів нейронної мережі. Зображення буде вважати одним із входів нейронної мережі, а один з виходів буде задіяний для виведення результату.

На цьому етапі необхідно коротко зупинитися на класифікації нейронних мереж. На сьогоднішній день основних видів три [3–5]:

- згорткові нейронні мережі (CNN);
- рекурентні мережі (deep learning);
- навчання з підкріпленням.

Один із найчастіших прикладів побудови нейронної мережі – це класична топологія нейронної мережі. Така нейронна мережа може бути представлена як повнозв'язний граф, характерною її рисою є пряме поширення інформації та зворотне поширення сигналізації про помилку. Ця технологія не має рекурсивних властивостей. Ілюстративно нейронну мережу із класичною топологією можна зобразити на рис. 1-2.

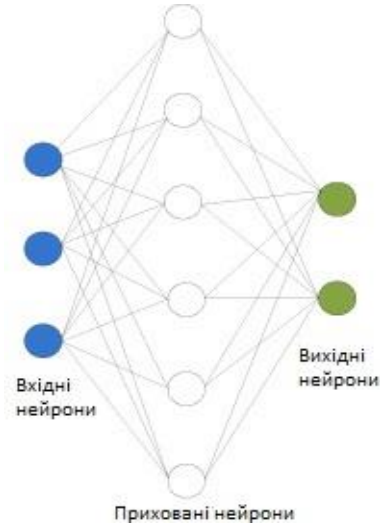


Рис. 1. Нейронна мережа із найпростішою топологією

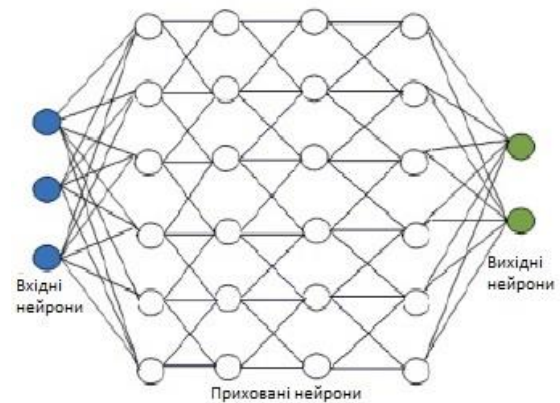


Рис. 2. Нейронна мережа з 4-ма шарами прихованих нейронів

Один із явно суттєвих мінусів цієї топології мережі – надмірність. За рахунок надмірності при подачі даних у вигляді, наприклад, двовимірної матриці на вхід, можна отримати одномірний вектор. Так, для зображення рукописної латинської літери, описаної за допомогою матриці розміром 34x34, потрібно 1156 входів. Це говорить про те, що обчислювальні потужності, що витрачаються на реалізацію програмно-апаратного рішення даного алгоритму, виявляться занадто великими.

Проблема була вирішена американським ученим Яном Ле Куном, який провів аналіз робіт лауреатів Нобелівської премії у галузі медицини Т. Wtesel та D. Hubel [6, 7]. В рамках дослідження, проведеного ними, як об'єкт дослідження виступила зорова кора головного мозку кішки. Аналіз результатів показав, що в корі є ряд простих клітин, а також ряд складних клітин. Прості клітини реагували на отримане від зорових рецепторів зображення прямих ліній, а складні

– на поступальний рух одному напрямку. В результаті було вироблено принцип побудови нейронних мереж, званий згортковим. Ідея цього принципу полягала в тому, що для реалізації функціонування нейронної мережі використовується чергування згорткових шарів, які прийнято позначати $C - \text{Layers}$, субдискретизуючих шарів $S - \text{Layers}$ та повнозв'язкових шарів $F - \text{Layers}$ на виході з нейронної мережі.

В основі побудови мережі подібного роду лежать три парадигми – це парадигма локального сприйняття, парадигма ваг, що розділяються, і парадигма субдискретизації.

Суть парадигми локального сприйняття у тому, що у кожен вхідний нейрон подається не вся матриця зображення, та її частина. Інші частини подаються інші вхідні нейрони. В даному випадку можна спостерігати механізм розпаралелювання, за допомогою подібного методу можна зберігати топологію зображення від шару до шару, багатомірно обробляючи його, тобто в процесі обробки може використовуватися кілька нейронних мереж.

Парадигма ваг, що розділяються, говорить про те, що для безлічі зв'язків може бути використаний невеликий набір ваг. Дані набори мають назву «ядра». Для кінцевого результату обробки зображень можна сказати, що ваги, що розділяються, позитивно впливають на властивості нейронної мережі, при дослідженні поведінки якої підвищується здатність знаходження інваріантів у зображеннях і фільтрувати шумові компоненти, не виробляючи їх обробку.

Виходячи з вищевикладеного можна зробити висновки про те, що при застосуванні процедури згортання зображення на базисі ядра з'явиться вихідне зображення, елементи якого будуть головною характеристикою відповідності фільтру, тобто відбудеться генерація карти ознак. Цей алгоритм наведено на рис. 3.

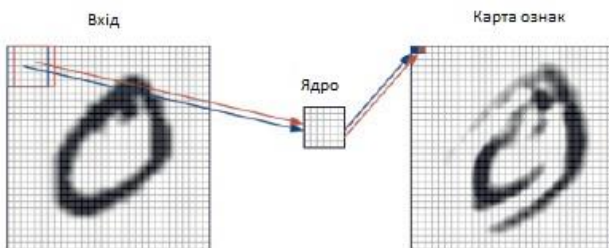


Рис. 3. Алгоритм генерації карти ознак

Парадигма субдискретизації у тому, що відбувається зменшення вхідного зображення рахунок зменшення просторової розмірності його математичного еквівалента – n -мерної матриці. Необхідність субдискретизації виявляється в інваріантності масштабу вихідного зображення. При застосуванні методики чергування шарів з'являється можливість генерації нових карт ознак з наявних, тобто практична реалізація даного методу полягає в тому, що буде придбана здатність виродження багатовимірної матриці у векторну, а потім і зовсім в скалярну величину.

Рекурентні нейронні мережі (RNN) – це тип нейронних мереж, що особливо підходять для обробки послідовних даних, таких як текст, часові ряди та аудіосигнали.

Плюси рекурентних нейронних мереж:

- Гнучкість: RNN може обробляти дані різних розмірів та форматів, що робить її гнучкою та застосовною для різних завдань.

- Обробка послідовностей: RNN відмінно працює з послідовними даними, такими як тексти, часові ряди та аудіосигнали, оскільки вона може запам'ятовувати попередні значення та використовувати їх для прогнозування наступних значень.

- Ефективність: RNN може ефективно обробляти дані у великих обсягах, що робить її придатною для великих та складних.

Мінуси рекурентних нейронних мереж:

- Проблема довгої комп'ютерної пам'яті: RNN зазнає труднощів при роботі з довгими послідовностями, оскільки вона повинна запам'ятовувати довгі залежності між елементами вхідних даних, що потребує багато пам'яті.

- Труднощі оптимізації: RNN також може відчувати труднощі при оптимізації, оскільки градієнти, які вона використовує для навчання, можуть швидко зникати або виходити за межі, що може призвести до неефективного або невдалого навчання.

- Труднощі в інтерпретації: RNN може бути скрутною для інтерпретації, оскільки вона складна і використовує багато шарів, щоб обробляти дані.

- Необхідність у великій кількості даних: RNN вимагає більше.

Навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) – це метод машинного навчання, у якому наша система (агент) навчається методом спроб та помилок. Ідея полягає в тому, що агент взаємодіє із середовищем, паралельно навчаючись, і отримує винагороду за виконання дій.

Плюси навчання із підкріпленням:

- Застосування до реальних завдань: Навчання з підкріпленням може бути застосоване до багатьох реальних завдань, таких як ігри, керування роботами тощо.

- Навчання шляхом проб та помилок: Навчання з підкріпленням дозволяє моделі навчатися шляхом проб та помилок, випробовуючи різні варіанти та отримуючи зворотний зв'язок у вигляді нагороди або штрафу.

- Мотивація: Навчання з підкріпленням може бути мотивуючим для моделі, оскільки вона може бачити прямий зв'язок між своїми діями та отриманою нагородою.

Мінуси навчання з підкріпленням:

- Труднощі у формулюванні завдання.

Реалізація навчання нейронної мережі

Існуючі мережі діляться на 3 класи архітектур з погляду навчання:

- навчання з учителем (перцептон);

Плюси: простота; застосування до багатьох завдань; результати у вигляді чітко визначених класів.

Мінуси: перцептрон має обмежену ефективність під час вирішення завдань із складнішими межами класів; неможливість вирішення завдань із нелінійними межами класів.

Навчання з учителем, або supervised learning, є одним із найпоширеніших типів машинного

навчання. Воно використовується в широкому спектрі завдань, таких як:

- класифікація: класифікація зображень, текстів, звуків тощо;
- регресія: прогноз числових значень, таких як ціни на нерухомість, погода і т.д.;
- обробка природної мови: класифікація тональності тексту, переклад тексту іншою мовою тощо;
- аналіз даних: виявлення викидів, кластеризація.

Загалом, навчання з учителем може бути використане в будь-якій задачі, де є достатній обсяг навчальних даних з відомими мітками або значеннями.

- навчання без вчителя (мережі адаптивного резонансу);

Плюси: автоматична класифікація; виявлення подібностей; ефективність. Мінуси: відсутність явних міток; складність налаштування.

Мережі Adaptive Resonance Theory (ART) - це один з типів нейронних мереж, які можна використовувати для навчання без вчителя. Їх можна використовувати у випадках, коли дані мають нелінійну структуру або коли необхідно враховувати динамічну поведінку даних. Мережі ART можна використовувати для кластеризації, зменшення розмірності та виявлення викидів. Деякі приклади програм включають обробку зображень та аудіо, аналіз фінансових даних та розпізнавання образів.

Загалом використання мереж ART найкраще підходить для ситуацій, коли дані мають складну структуру та традиційні методи навчання без вчителя, такі як K-Means або PCA, неефективні. Важливо, що вибір відповідного методу машинного навчання залежить від конкретної задачі та характеристик даних.

- змішане навчання (мережі радіально-базових функцій).

Плюси: простота використання; гнучкість; поліпшена точність; загальні характеристики. Мінуси: складність підбору; високий час обчислення.

Загалом змішане навчання з мережами RBF може бути хорошим вибором для завдань, де як контрольоване, так і неконтрольоване навчання можуть надати додаткову інформацію. Деякі приклади програм включають класифікацію зображень, обробку природної мови та аналіз фінансових даних.

Однак важливо відзначити, що вибір відповідного методу машинного навчання залежить від конкретної проблеми та характеристик даних. Продуктивність мереж RBF іноді може бути чутливою до вибору параметрів та якості даних, тому важливо ретельно розглянути придатність цього методу для цієї проблеми, перш ніж використовувати його.

Варто також відзначити, що навчання мережі проводиться на спеціально підготовлених базах зображень, класифікованих на велику кількість класів, і займає досить багато часу. На сьогодні найбільшою базою є ImageNet (www.image_net.org) [8]. Вона має безкоштовний доступ до академічних установ.

Оцінка нейронної мережі

Існує кілька підходів для оцінювання нейронних мереж, які можуть відрізнятися залежно від завдання та даних. Ось кілька із них:

Оцінка точності: цей підхід зосереджений на оцінці точності мережі даних валідації. Точність може бути оцінена з використанням метрик, таких як точність (accuracy), повнота (precision), одержання (recall) та міра.

Крос-валідація: у цьому підході дані розбиваються на кілька частин, і кожна частина використовується як валідаційні дані по черзі. Цей підхід дозволяє отримати більш впевнені оцінки точності мережі.

Оцінка перенавчання: у цьому підході оцінюється, наскільки добре нейронна мережа узагальнюється нові дані. Оцінка перенавчання може включати порівняння точності мережі.

Один із найважливіших критеріїв оцінки роботи нейронної мережі у разі розпізнавання зображення – це якість розпізнавання зображень. Варто зазначити, що для кількісної оцінки якості розпізнавання зображення за допомогою функціонування нейронної мережі найчастіше застосовується алгоритм середньоквадратичної помилки [6]:

$$E^P = \frac{1}{2} (D^P - 0(I^P, W))^2, \quad (1)$$

У залежності (1) E^P - р-та помилка розпізнавання для пари нейронів,

D^P – очікуваний вихідний результат нейронної мережі (звичай мережа має прагнути розпізнавання на 100 %, але цього практично поки що не відбувається), а конструкція $O(I^P, W)^2$ – квадрат виходу мережі, який залежить від р-ого входу і набору коефіцієнтів ваги W . До цієї конструкції входять і ядра згортки, і вагові коефіцієнти всіх верств. Прорахунок помилки полягає у обчисленні середнього арифметичного значення для всіх пар нейронів.

В результаті аналізу було виведено закономірність, що номінальне значення ваги, коли значення помилки буде мінімальним, можна розрахувати виходячи із залежності (2):

$$W_{min} = W_c - \left(\frac{d^2 E(W_c)}{dW^2} \right)^{-1} \frac{dE(W_c)}{dW}, \quad (2)$$

W_{min} - мінімальний коефіцієнт ваги. W_c – середній коефіцієнт ваги. З цієї залежності можна сказати, що завдання обчислення оптимальної ваги є арифметична різниця похідної функції першого порядку помилки за вагою, розділена на похідну функції другого порядку помилки [7].

Наведені залежності дають можливість тривіального обчислення помилки, що у вихідному шарі. Обчислення помилки у прихованих шарах нейронів можна реалізувати за допомогою методу зворотного розповсюдження помилки. Основна ідея методу полягає у поширенні інформації, у вигляді сигналізації про помилку, від вихідних нейронів до вхідних, тобто у напрямку, зворотному по відношенню до поширення сигналів нейронної мережі [6].

Висновки

Програма, реалізована з урахуванням алгоритмів, основою яких входить нейронна мережа, буде значно ефективніше.

Підсумовуючи, можна резюмувати наступне:

- Нейронні мережі можуть знаходити застосування як у питанні розпізнавання зображень.

• Ця теорія дає можливість говорити про створення нового перспективного класу моделей, а саме моделей на основі інтелектуального моделювання.

• Нейронні мережі здатні до навчання, що свідчить про можливість оптимізації процесу з функціонування. Така можливість є надзвичайно важливою опцією для практичної реалізації алгоритму.

• Оцінка алгоритму розпізнавання образів з допомогою дослідження нейронної мережі може мати кількісне значення, відповідно, є механізми підстроювання параметрів необхідного значення з допомогою обчислення потрібних вагових коефіцієнтів.

На сьогоднішній день, подальше дослідження нейронних мереж є перспективною областю дослідження, яка успішно застосовуватиметься в ще більшій кількості галузей науки і техніки, а також діяльності людини. Основний наголос у розвитку сучасних систем розпізнавання зараз зрушується в область семантичної сегментації 3D зображень у геодезії, медицині, прототипуванні та інших сферах діяльності людини – це досить складні алгоритми і це пов'язано з:

• З відсутністю достатньої кількості баз даних еталонних зображень.

• Відсутність достатньої кількості вільних експертів для початкового навчання системи.

• Зображення зберігаються не в пікселях, що

потребує додаткових ресурсів як від комп'ютера, так і від розробників.

Слід також зазначити, що на сьогоднішній день існує велика кількість стандартних архітектур побудови нейронних мереж, що суттєво полегшує задачу побудови нейронної мережі з нуля і зводить її до підбору структури мережі, що відповідає конкретній задачі.

В даний час на ринку існує досить велика кількість інноваційних компаній, які займаються розпізнаванням зображень із використанням нейромережових технологій навчання системи. Достеменно відомо, що вони досягли точності розпізнавання зображень в районі 95% при використанні бази даних 10 000 зображень.

В даний час на ринку існує досить велика кількість інноваційних компаній, які займаються розпізнаванням зображень із використанням нейромережових технологій навчання системи. Достеменно відомо, що вони досягли точності розпізнавання зображень в районі 95% при використанні бази даних 10 000 зображень. Проте всі досягнення відносяться до статичних зображень, з динамічними зображеннями ситуація не однозначна. Тому дослідження в галузі розпізнавання динамічних зображень за допомогою нейронної мережі є актуальними і потребують подальшого розвитку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Нейронні мережі: їх застосування, робота [Electronic resource] – URL: <https://www.poznavayka.org/>
2. Neural Networks Modeling and Control: Applications for Unknown Nonlinear Delayed Systems in Discrete Time Authors: Jorge Rios, Alma Alanis, Nancy Arana-Daniel, Carlos Lopez-Franco -2020. – 158 p.
3. Згорткова нейронна мережа – просте пояснення CNN та її застосування [Electronic resource] – URL: <https://evergreens.com.ua/ua/articles/cnn.html>
4. Рекурентні нейронні мережі [Electronic resource] – URL: <https://studfile.net/preview/7653871/page:9/>
5. Навчання з підкріпленням у машинному навчанні [Electronic resource] – URL: <https://goo.su/i0gLlZ9>
6. Y. LeCun, L. Bottou, G. Orr and K. Muller: Efficient BackProp, in Orr, G. and Muller K. (Eds) // Neural Networks: Tricks of the trade. – 2008. – 200 p.
7. Y. LeCun and Y. Bengio: Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series, in Arbib, M. A. (Eds) // The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. – 2005. – 150 p.
8. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook by Charu C. Aggarwal – 2018. - 520 p.

Received (Надійшла) 17.12.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.02.2023

Analysis of approaches to solving the problem of picture recognition using artificial intelligence

Danil Klieshch, Volodymyr Fedorchenko

Abstract. Topicality. Text recognition on images (optical character recognition) is one of the areas of image recognition, the task of which is to translate images of handwritten, typewritten or printed text into text data that is used to represent characters on a computer (for example, in a text editor). Recognizing text on images is an important task of machine learning, as it allows you to organize convenient interaction with data: editing, analysis, searching for words or phrases, etc. Nevertheless, the creation of an application in this field remains a creative task and requires additional research in connection with the specific requirements for resolution, speed, recognition reliability and memory capacity, which are characterized by each specific task. In the work, the algorithm for creating and learning the recognition of handwritten symbols of a neural network was considered, and the types of learning and classification of neural networks were also analyzed. **The goal of this work** there are recommendations and approaches to the selection of types of neural networks, methods and their training. The object of research is the task of image recognition of handwritten symbols. **The object of research** image recognition task. **The subject of research** recognition of images of text or symbols based on artificial intelligence. **Results.** the paper analyzed the types, training and classification of neural networks for creating recognition of handwritten symbols using a neural network. **Conclusions.** Currently, there is a fairly large number of innovative companies on the market that are engaged in image recognition using neural network learning system technologies. It is known for certain that they achieved image recognition accuracy of around 95% when using a database of 10,000 images. However, all achievements refer to static images, the situation is not clear-cut with dynamic images. Therefore, further research in the field of image recognition using a neural network is still being investigated, it is relevant now.

Keywords: neural network, perceptron, weight paradigm, cnn, rnn, adaptive resonance theory.

A. Kovalenko, R. Miroshnychenko, A. Martyntsov

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS BASED ON THE USE OF GRID TECHNOLOGIES

Abstract. The article describes the use of Grid technology in telecommunication systems and the creation of Grid telecommunication systems. Network service providers are focusing on huge consolidated data centers. Particular attention began to be paid to improving the methods of scheduling data processing tasks. The shortcomings of modern approaches to planning are considered. These include the inability to provide the maximum total priority of tasks performed at individual planning stages in distributed computing systems. The developed planning procedure is described. It overcomes this shortcoming. But at the same time, to reduce the total processing time of tasks in the system in comparison with the planning procedure based on solving the problem of the least coverage. The desire for the maximum sum of priorities of the selected tasks is the main criterion for selecting tasks from the queue, which we will characterize by the importance coefficient. The coefficient of preservation of importance and the coefficient of acceleration of the operation of the Grid-system segment are described. The article also proposes a solution to improve the efficiency and quality of task servicing. It is proposed to expand the functionality of distributed telecommunication systems based on the use of computer clusters using Grid technologies.

Keywords: Grid systems, Grid technologies, telecommunication systems.

Introduction

Modern computing systems represent a set of communication channels uniting them. They also represent a distributed environment for information processing and computing. The complication of various applications leads to an increase in the workload that are performed in distributed environments. On the one hand, there is a need to improve the performance of organization systems for more efficient use of resources and organization in a distributed computing environment. On the other hand, providing users with a wide range of distributed computing systems and various services. This additionally imposes requirements on the organization of distributed information processing and computing. Thus, modern distributed computing systems represent a distributed computing environment. Which is intended both for information processing and organization of calculations in a distributed environment. The term distributed computing or metacomputing was introduced in 1987 by Larry Smarr and Charles Catlett. This approach is based on the integration of computers through a data transmission network of specialized system software into a distributed computing system. The purpose of such a system is to provide equal access for users to its resources.

Resources - a set of software and hardware for the execution of processes. Resource examples: processor, communication medium, application software, storage system, etc. A process is a stream of instructions for a computer processor with a single address space, processor register values, stack, open files, global variables, etc.

The processors on the nodes of a distributed computing system often manage individual resources. We will consider the generalized concept of a virtual node (VN). Thus, VN is one computational element (processor core), considered in conjunction with comparisons of resources to it. If several processors use the same resources characterized by volume (RAM,

permanent memory, etc.), then we will assume that the volume of these resources is evenly divided among all virtual nodes corresponding to these processors. Figure 1 schematically shows the ratio of VN and resources in one computing node.

The phrase "Other resources" in Fig. 1 denotes additional capabilities of computing nodes. For example, the presence of graphics or signal processors, specialized electronic boards for accelerating calculations.

Main part

A distributed computing system may include computing systems of different architectures. A description of the features of modern computing architectures is available in [1]. Features of the architecture of modern high-performance systems are described in.

The most common implementations of distributed computing systems are systems built using Grid technology [1, 2]. The definition of the term Grid is currently not consistent. We will adhere to the definition of Ian Foster and Carl Kesselman [1]: "Grid is a consistent, open and standardized environment that provides flexible, secure and coordinated resource allocation within a virtual organization." A virtual organization is understood as an association of users and real organizations, which is a subset of resources in the Grid. The purpose of introducing such a union is the need for separation of powers in the Grid between users.

In most cases, computational clusters act as Grid nodes. They are located remotely and differ in their characteristics. In the general case, a computing cluster is a parallel scalable computing system and includes a set of high-performance computers (cluster processor nodes) connected by communication networks and controlled by a single task manager [3, 4].

When integrating processor nodes into a single inter-node cluster, communications are carried out by passing messages between task processes.

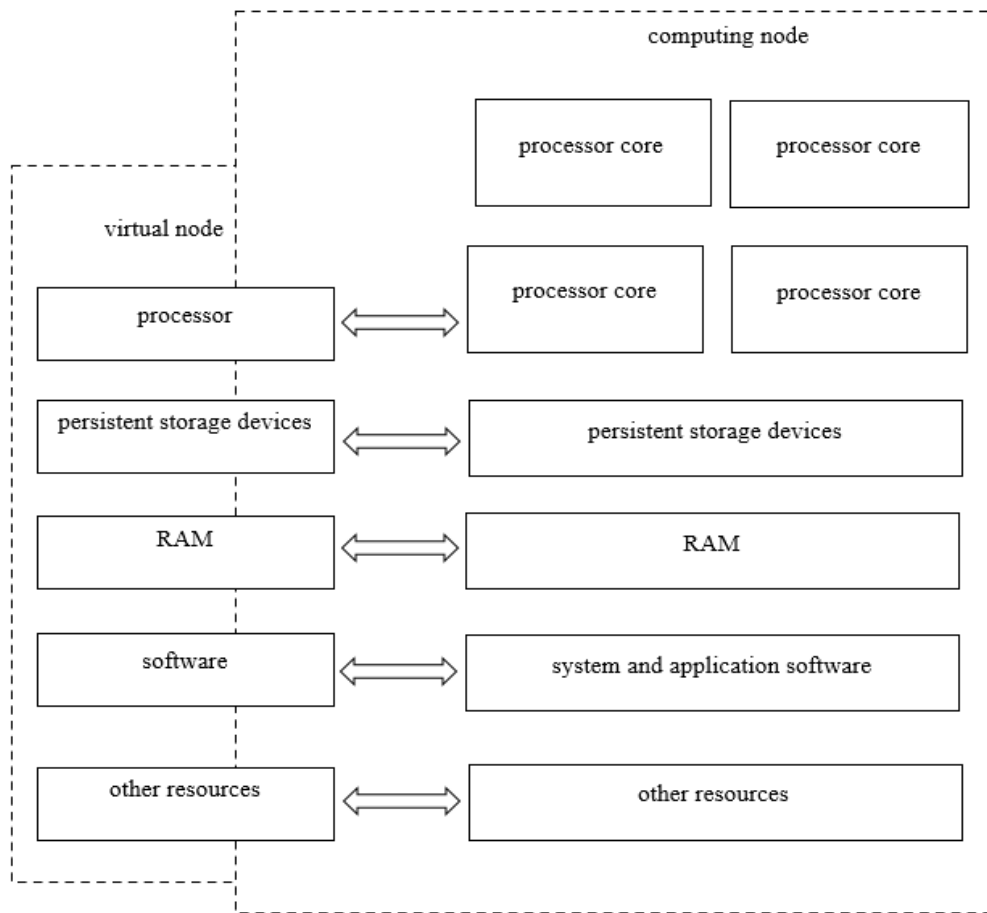


Fig. 1. Relationship between virtual and physical nodes of a distributed computing system

In addition to computing clusters, other types of nodes can be included in the Grid. For example, visualization workstations or network storages. The term Grid is based on the electrical power grid metaphor, which provides users with electricity on demand without the need for knowledge of where and how it is generated.

Access to resources in the Grid is usually carried out through services [5] present on each of the nodes. Services must be standardized within the Grid. This allows uniform access to all resources. Absolutely regardless of its type and local policies on the site. The Open Grid Services Architecture standard for building Grid services unifies the creation, naming, and interaction of services.

The Globus Toolkit has become the de facto standard for building a Grid based on the Open Grid Services Architecture. This software package includes task management services. For monitoring and coordinating the remote execution of tasks. Also, data collection services based on the use of the LDAP protocol. Grid Security Infrastructure Security Services. Its components are based on X.509 digital certificate technology and data management services. They allow users to access, transfer and manage distributed data.

In a computing system, applications can be divided into three classes: distributed, parallel, and non-parallel.

Distributed Grid applications (multi-site Grid applications) - a class of applications that can be run on multiple Grid nodes. In other words, the processes of

one distributed application can be launched on several computing clusters simultaneously.

Distributed applications are practically not used in the Grid due to the lack of support from the Grid toolkits. The main difficulty here is that computing clusters are controlled by their local resource management systems. Thus, the control of all processes of a task distributed among several clusters becomes more complicated.

There is another reason for the low prevalence of this class of applications. The difference between the speed characteristics of data transfer between nodes of the same cluster and between several clusters can be very different. Accounting for this property of data transmission networks complicates the distributed application method.

Also, the heterogeneity of the architecture of processors in the composition of Grid sites can become an obstacle to the development of the sphere of distributed applications. When running a program, it is useful to compile the source code for a given processor architecture after scheduling and running the job on the Grid node. Such compilation in some cases can significantly speed up the application by optimizing the binary code for a given processor architecture. Obviously, in this case, the distributed application must be compiled and run in several different copies. This makes it difficult to design such applications.

In the vast majority of cases, it is possible to decompose a distributed algorithm into several parallel

or non-parallel ones. After the completion of the calculations of many such tasks corresponding to one distributed task, the received data is collected and processed separately.

Parallel applications belong to a different class. Unlike distributed applications of this class, they are designed to run on a homogeneous computing cluster or a multiprocessor system with shared memory.

A program with the number of processes will be called parallel $N > 1$, concurrently executed on N homogeneous processors. The processes of a parallel program can potentially exchange data with each other as over a data transmission network. It is possible to use the mechanisms of interaction of processes within the framework of the same operating system (Inter-Process Communication). All processes of a parallel program must be scheduled to run simultaneously. This type of planning is called gang-scheduling.

In the general case, a parallel task is a user instruction to run one parallel program with certain resource requirements. It gives her all the data files necessary for the calculation. In scheduling parallel tasks for Grid, it is important that the processes of one program do not go beyond one VN group - the Grid node. An example of a parallel task is the execution of an MPI application on the nodes of a computing cluster.

A program that includes only one computational process will be called non-parallel. A non-parallel task would be a user guide to execute one or more non-parallel programs between which there is no interaction.

Often such a task involves running multiple copies of the same program with different input parameters.

In non-parallel applications, a control program is often used. It collects the results of the calculations and issues a new portion of the input data. This type of architecture is called Supplier-consumer [1]. Isolated computing processes often make it easier to develop and maintain applications. Examples of algorithms with isolated processes are Map-Reduce [1, 2] and a family of k-means algorithms [6], which are used in data analysis methods, mathematical statistics, and other fields of knowledge.

Conclusions

Therefore, the principal direction in the development of modern distributed computing systems is the development of appropriate methods of planning models. Therefore, increasing the efficiency and quality of servicing tasks, characterized by the coefficient of importance, the coefficient of acceleration of the tasks. Also disclosed is the expansion of the functionality of distributed telecommunication systems based on the use of computer clusters using Grid technologies. The goal is achieved by developing a method for scheduling the execution of tasks.

They are based on planning the execution of tasks, solving the problem of non-linear Boolean programming, developing a solution method based on the rank approach. This approach improves planning efficiency.

REFERENCES

1. Foster I. The Physiology of the Grid: An Open Grid Services Architecture for Distributed Systems Integration. – Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., 2002– 57 p.
2. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), “Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object’s control system”, *Advanced Information Systems*, 2018, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
3. Yakovleva, O., & Nikolaieva, K. (2020). Research of descriptor based image normalization and comparative analysis of SURF, AKAZE descriptors. *Advanced Information Systems*, 4(4), 89–101. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.13>
4. Ruban, I.V., Martovytskyi, V.O., Kovalenko, A.A. and Lukova-Chuiko, N.V. (2019), “Identification in Informative Systems on the Basis of Users' Behaviour”, *Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019-September*, 9019446, pp. 574-577, DOI: <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019446>
5. Rukkas, K., & Zholtkevych, G. (2020). Probabilistic model for estimation of cap-guarantees for distributed datastore. *Advanced Information Systems*, 4(2), 47–50. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.09>
6. Foster I., Kesselman C., Nick J.M. and Tuecke S. Grid Services for Distributed Systems Integration // *IEEE Computer*.– 2002.– № 6.– P. 37-46.

Received (Надійшла) 24.12.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.02.2023

Розподілені обчислювальні системи на основі використанням Grid технологій

А.А. Коваленко, Р. О. Мирошніченко, А. Ф. Мартинцов

Анотація. У статті обґрунтовано використання та впровадження технології Grid у телекомунікаційні системи та створення телекомунікаційних Grid систем. Постачальники мережних сервісів, спираючись на великі консолідовані центри обміну даних, особливу увагу стали приділяти вдосконаленню методів планування завдань обробки даних. Розглянуто недоліки сучасних підходів планування, до них можна віднести відсутність можливості забезпечити максимальний сумарний пріоритет виконуваних завдань на окремих етапах планування в розподілених обчислювальних системах. Описана розроблена процедура планування, що дозволяє подолати зазначений недолік, при цьому зменшити сумарний час обробки завдань в системі в порівнянні з процедурою планування на основі рішення завдання про найменше покриття. Прагнення до максимальної суми пріоритетів обраних завдань є головним критерієм при виборі завдань з черги, який будемо характеризувати коефіцієнтом важливості, коефіцієнтом збереження важливості та коефіцієнтом прискорення роботи сегмента Grid - системи. Також у статті запропоновано рішення щодо підвищення ефективності та якості обслуговування завдань, а також розширення функціональних можливостей розподілених телекомунікаційних систем на основі використання комп'ютерних кластерів із застосуванням Grid технологій.

Ключові слова: Grid системи, Grid технології, телекомунікаційні системи.

А. А. Коваленко, Р. О. Ярошевич

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ТРАНЗАКЦІЙ У СЕРЕДОВИЩІ ТАКТИЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ

Анотація. Актуальність. Тактильний Інтернет – це одна з основних технологій, що визначає чергову еволюцію мережі Інтернет, яка дозволяє передавати тактильні відчуття в режимі реального часу. Транзакція є основною процесу комунікації та обслуговування в Тактильному Інтернеті та використовується для передачі даних між різними вузлами в мережі. Моделюючи процес обробки транзакцій у Тактильному Інтернет-середовищі, можна спрогнозувати продуктивність роботи за різних сценаріїв і визначити області для подальшого вдосконалення. Це надасть змогу забезпечити надійність та доступність, а також низьку затримку у вузлах мережі Тактильного Інтернету. **Метою даної роботи** є моделювання процесу обробки транзакцій для забезпечення надійності, доступності та низької затримки при передачі даних у середовищі Тактильного Інтернету. **Об’єктом дослідження** є процес обробки транзакцій у середовищі Тактильного Інтернету. **Предметом дослідження** є методи оптимізації архітектури Тактильного Інтернету. **Результати.** В даній статті описані кроки процесу обробки транзакцій у Тактильному Інтернет-середовищі, включаючи збір даних, аналіз і генерацію команд керування. Розглянуто основні складові архітектури Тактильного Інтернету, а саме ведучий, ведений та мережний домени, і пропонується використання програмно-конфігурованих мереж для керування мережним трафіком та підвищення продуктивності мережі Тактильного Інтернету. Крім того, розглядаються питання масштабування ресурсів, на основі тривірневої архітектури Тактильного Інтернету та зменшення кількості керованих інтелектуальних контролерів з використанням протоколу OpenFlow. **Висновок.** Розглянута модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету здатна забезпечити тактильний зворотний зв’язок з низькою затримкою та покращити ефективність мережі, що буде мати позитивний вплив на взаємодію з користувачем і дозволить створювати нові програми та сценарії в таких сферах, як медицина, робототехніка, віртуальна та доповнена реальність.

Ключові слова: Тактильний Інтернет, хмарна інфраструктура, транзакція, контролер, SDN, MEC, NFV, OpenFlow

Вступ

Швидкий розвиток сучасних мережних технологій призвів до значного розвитку і поширення Тактильного Інтернету (ТІ), нової парадигми взаємодії людини та машини.

Тактильний Інтернет – це одна з основних технологій, що визначає чергову еволюцію мережі Інтернет, яка дозволяє передавати тактильні відчуття в режимі реального часу так само, як раніше це було з передачею мови та відео.

Ключова проблема Тактильного Інтернету полягає в тому, щоб забезпечити точний і послідовний тактильний зворотний зв’язок у режимі реального часу через комп’ютерну мережу.

Процес обробки транзакцій у Тактильному Інтернет-середовищі включає складну взаємодію між тактильними датчиками, тактильними приводами, мережною інфраструктурою та алгоритмами керування.

Такий процес включає етапи збору даних, обробки сигналу, передачі, контроль зворотного зв’язку, виправлення помилок, інтерполяцію та згладжування.

Мета полягає в тому, щоб забезпечити тактильний зворотний зв’язок вимогам точності в режимі реального часу, який покращує взаємодію з користувачем і дозволяє створювати нові програми та сценарії в таких сферах, як медицина, робототехніка, віртуальна та доповнена реальність, тощо.

Метою цієї роботи є моделювання процесу обробки транзакцій для забезпечення надійності, доступності та низької затримки при передачі даних у середовищі Тактильного Інтернету.

Аналіз процесу обробки транзакцій у середовищі Тактильного Інтернету

Тактильний Інтернет складається з мережних пристроїв, які з’єднані між собою через високошвидкісні канали зв’язку з малою затримкою. Він призначений для забезпечення контролю в реальному часі та зв’язку між людьми та машинами. Транзакція є основною процесу комунікації та обслуговування в Тактильному Інтернеті та використовується для передачі даних між різними вузлами в мережі. Процес обробки транзакцій має вирішальне значення для ефективного функціонування Тактильного Інтернету та складається з наступних кроків, які показані на рис. 1.



Рис. 1. Процес обробки транзакцій у середовищі Тактильного Інтернету

Першим кроком є збір даних від датчиків і приводів, які підключені до мережі Тактильного Інтернету.

ету. Ці дані представляють фізичні властивості та стан об'єктів, що контролюються. Зібрані дані передаються через мережу на центральний процесор для аналізу. Цей крок передбачає моделювання швидкості передачі, затримки та надійності мережі. Після того, як тактильні дані були зібрані, вони аналізуються для забезпечення їх точності і перетворення у формат, який можна передавати через Інтернет. Цей процес виконується серією алгоритмів і математичних моделей, які призначені для виконання конкретних завдань, таких як стиснення даних, виправлення помилок і обробка сигналів.

За результатами аналізу даних центральний процесор формує команди керування для виконавчих механізмів. Цей крок передбачає моделювання процесу прийняття рішень, включаючи оцінку компромісів і вибір найкращої стратегії контролю. Команди керування передаються по мережі до приводів, які виконують бажаний рух або дію, що передбачає моделювання часу відгуку та точності приводів. Постійно контролюється стан об'єктів та мережі, відповідно коригується стратегія керування. Цей крок передбачає моделювання циклу зворотного зв'язку, включаючи час відгуку, точність та надійність. Моделюючи процес обробки транзакцій, можна спрогнозувати продуктивність мережі ТІ за різних сценаріїв і визначити області для покращення. Це може допомогти оптимізувати архітектуру та підвищити загальну ефективність та надійність, оцінити масштабованість мережі ТІ та її здатність обробляти великі обсяги даних і складні контрольні завдання. Крім того, це дасть змогу моделювання різних умов мережі, таких як перевантаження, збої та загрози безпеці, щоб оцінити стійкість і безпеку мережі ТІ.

З точки зору техніки моделювання, залежно від складності та специфіки побудови мережі ТІ можуть бути використані різні засоби моделювання та математичні моделі. Наприклад, моделювання дискретних подій, теорія масового обслуговування та Марківські моделі зазвичай використовуються для моделювання продуктивності складних технологій.

Методи оптимізації архітектури Тактильного Інтернету

Архітектура мережі ТІ складається із трьох доменів: ведучого, веденого та мережного. Основна проблема, з якою стикається перевірка мережного домену – це затримка в 1 мс.

У джерелі [1] для побудови мережного домену пропонується використання нових технологій, таких як програмно-конфігуровані мережі (Software Defined Network, SDN), віртуалізація мережних функцій (Network Functions Virtualization, NFV) та мобільні граничні обчислення (Mobile Edge Computing, MEC) [2]. Програмно-конфігурована мережа SDN – це метод адміністрування комп'ютерних мереж, що дозволяє керувати послугами мережі, коли функціонал управління (control plane) відокремлений від рівня пересилки пакетів (data plane). Планування мережі та управління трафіком при цьому відбувається програмним шляхом. Віртуалізація мережних функцій NFV – це технологія віртуалізації фізичних мережних елементів

телекомунікаційної мережі, коли мережні функції виконуються програмними модулями, які працюють на стандартних серверах і віртуальних машинах в них. SDN та NFV в концепції Тактильного Інтернету – це поділ функцій керування мережею, потоком трафіку та функцій комутації пакетних даних. Функції розрахунку топології мережі та таблиць маршрутизації трафіку виконуються на окремому пристрої – контролері мережі.

Функції комутації та маршрутизації пакетів виконуються на мережному устаткуванні, яке підтримує завантаження таблиць комутації з центрального мережного контролера, зазвичай із використанням протоколу OpenFlow, що дозволяє масштабувати ресурси, необхідні для керування трафіком.

Крім того, централізація рівня керування знижує кількість керованих інтелектуальних пристроїв, полегшує роботу мережі та надання послуг. OpenFlow протокол має низьку ефективність у термінах масштабованості мережі для великих мереж [3]. Однак ця проблема може бути вирішена використанням окремих OpenFlow-мереж у різних областях мережі та балансуванням навантаження [4].

Програмно-конфігурована мережа SDN дає можливість розділити рівень керування та рівень передачі даних, що надає наступні нові можливості:

- 1) спрощення адміністрування та гнучкості мережі;
- 2) спрощення апаратної частини;
- 3) зменшення кругової затримки та надійність мережі;
- 4) можливість впровадження інновацій;
- 5) висока ефективність мережі.

Одним з важливих чинників, які впливають на значення затримки, є число мережних вузлів. Кількість вузлів, що беруть участь у процесі забезпечення взаємодії між користувачами повинно бути якнайменше та рівномірно розташованими. Мобільні граничні обчислення є однією з ключових можливостей щодо забезпечення таких вимог. Концепція MEC поєднує у собі переваги трьох технологій: мобільного інтернету, мобільних обчислень та хмарних обчислень [5] та може надати багато нових можливостей, насамперед наступних:

- 1) зменшення затримки при передачі даних;
- 2) збільшення смуги пропускання;
- 3) ефективне вивантаження трафіку з ядра мережі.

Модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету

Надання послуг Тактильного Інтернету вимагає від мережі надійності та доступності, а також низької затримки при передачі даних та при обробці заявок. Це накладає обмеження на компоненти мережі ТІ з погляду контексту, контенту та мобільності. В даній статті реалізація моделі процесу обробки транзакцій, заснована на взаємодії вузлів мережі Тактильного Інтернету та будується з використанням технологій MEC, SDN та NFV.

Трирівнева архітектура взаємодії вузлів мережі ТІ зображена на рис. 2.

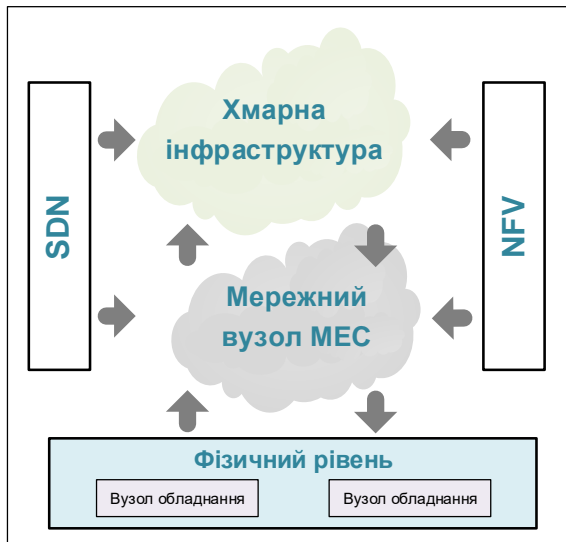


Рис. 2. Трирівнева архітектура взаємодії вузлів мережі ТІ

Трирівнева архітектура складається із фізичного рівня, який являє собою вузол обладнання; другого рівня – набір граничних вузлів, які обслуговують пристрої першого рівня та третього рівня – хмарна інфраструктура, яка є головною та включає інтеграцію різних протоколів. У мережі ТІ розгортається єдиний централізований фізичний контролер SDN, який контролює та керує розподіленими вузлами MEC, розподіленими комутаторами, а також пристроями ТІ. Розподілена програмно-конфігурована мережа SDN дозволяє програмувати MEC-вузли та пристрої ТІ, а також керувати ними через інтерфейси прикладного програмування (API). Мережа Тактильного Інтернету в цілому пов'язана за допомогою комутаторів OpenFlow, які управляють пакетами даних та перенаправляють трафік відповідно до маршрутних таблиць. Проміжні пристрої є стандартним обладнанням, яке може бути надано мережним операторам з можливістю використовувати додаткові функції, такі як міжмережний екран та трансляція мережних адрес. Основними вимогами до функцій та послуг, що надаються цими проміжними пристроями, є ефективне використання ресурсів та захист мережі від атак. Всі ці елементи відносяться до рівня передачі ме-

режі. Важливу роль в даній архітектурі також грає центральний контролер SDN, який є рівнем керування мережею. На основі логіки програмування та керування він може виконувати функції та операції на рівні керування. Також він має і підтримує в актуальному вигляді глобальну інформацію про граничні пристрої та пристрої ядра мережі: комутатори OpenFlow, комутатори доступу, проміжні пристрої, мережі радіодоступу (Radio Access Network, RAN) і хмарні пристрої та платформи. Керує всіма периферійними пристроями та пристроями ядра мережі, які прописані у протоколі OpenFlow.

Модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету показано на рис. 3. Взаємодія вузлів мережі ТІ в даній моделі відбувається в декілька кроків. Першим кроком є автентифікація, оскільки вузол ведучого домену має бути авторизований. Тому він, за допомогою хмари, зв'язується безпосередньо з веденим доменом для авторизації. Потім хмара виконує процес аутентифікації та ідентифікує пристрій, що авторизується. Наступним кроком є визначення адреси, при якій хмара звертається до ведучого домену, щоб визначити його місцезнаходження. Для цього ведучий домен звертається до оркестратора SDN, який ініціалізує пошук пристрою та заповнює таблицю маршрутизації різними шляхами маршрутизації між вузлом ведучого домену та хмарою та знаходить усі комутатори, призначені для цього зв'язку. Контролер SDN дозволяє комутаторам виконувати деякі завдання обробки та обчислення даних, що пересилаються ведучим доменом після рівня MEC.

Контролер SDN оцінює комутатори із доступними ресурсами після перевірки певних параметрів:

- 1) транзитний трафік;
- 2) трафік доступу;
- 3) тип доступу до трафіку;
- 4) обмеження часу затримки;
- 5) обчислювальна потужність для обслуговування даних.

Контролер SDN визначає можливість включення даних, переданих до базової мережі через рівень туману, до складу доступних ресурсів комутаторів, оптимізуючи попередні параметри, і, таким чином, інформує обрані комутатори.

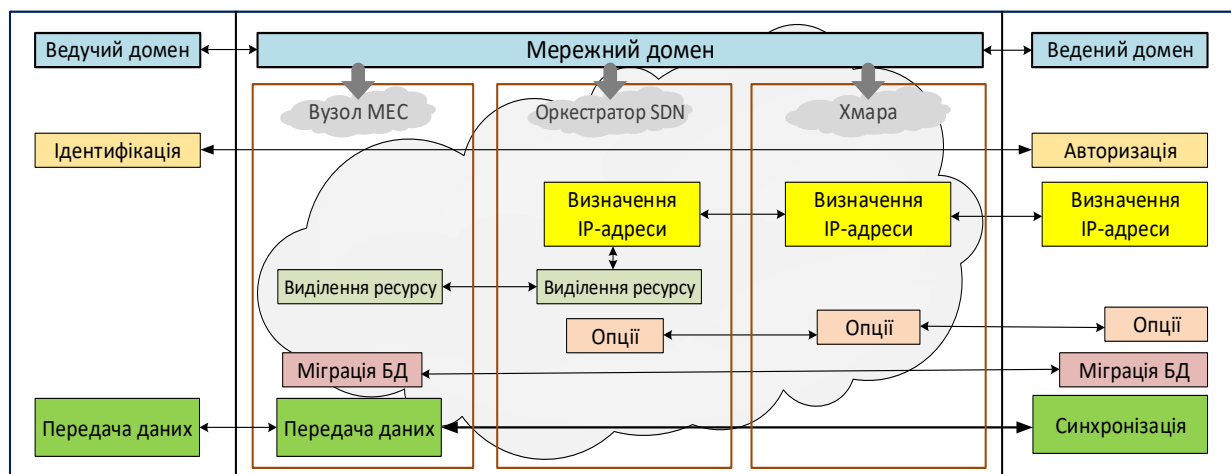


Рис. 3. Модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету

Оркестратор створює віртуальну машину на вибраних комутаторах, які використовуються для обробки даних. Наступним кроком є міграція бази даних. Хмара через постачальника послуг переносить базу даних через певні комутатори. Мережа продовжує працювати, а комутатори агрегують та синхронізують дані ведучого домену з хмарою та веденим доменом.

Висновки

В результаті проведених досліджень були запропоновані кроки процесу обробки транзакцій у середовищі Тактильного Інтернету, включаючи збір даних, аналіз і генерацію команд керування. У даній статті була представлена трирівнева архітектура взаємодії вузлів мережі Тактильного Інтернету з використанням технологій MEC, SDN та NFV що дозволяє забезпечити ефективне використання ресурсів та захист мережі ПІ від атак. Зокрема, розгортається

єдиний централізований фізичний контролер SDN, який контролює та керує розподіленими вузлами MEC, розподіленими комутаторами, а також пристроями ПІ. Розподілена програмно-конфігурована мережа SDN дозволяє програмувати MEC-вузли та пристрої ПІ, а також керувати ними через інтерфейси прикладного програмування. Також у мережі використовуються комутатори OpenFlow, які управляють пакетами даних та перенаправляють трафік відповідно до маршрутних таблиць. Розглянута модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету здатна забезпечити тактильний зворотний зв'язок з низькою затримкою та покращити ефективність мережі, що буде мати позитивний вплив на взаємодію з користувачем і дозволить створювати нові програми та сценарії в таких сферах, як медицина, робототехніка, віртуальна та доповнена реальність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fanibhare, Vaibhav, Nurul I. Sarkar, and Adnan Al-Anbuky. 2021. "A Survey of the Tactile Internet: Design Issues and Challenges, Applications, and Future Directions" *Electronics* 10, no. 17: 2171. <https://doi.org/10.3390/electronics10172171>
2. Ярошевич Р.О., Аналіз технологій підвищення ефективності Тактильного Інтернету у комп'ютерних мережах / Ярошевич Р.О., Коваленко А.А., // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 1 (67). – С. 106-110. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.106>.
3. Shalimov, A. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers / Shalimov, A.; Zuikov, D.; Zimarina, D.; Pashkov, V. and Smeliansky, R. // in Proc. the 9th central & eastern european software engineering conference, 2013. Кучук Г.А., Можаяв О.О., Воробйов О.В. (2006), "Аналіз та моделі самоподібного трафіка", *Авиационно-космическая техника и технология*, № 9(35), С. 173-180.
4. Blial, O. An overview on SDN architectures with multiple controllers / Blial, O.; Mamoun, M. and Benaini, R. // *Journal of Computer Networks and Communications*, 2016.
5. Gai, K. Dynamic energy-aware cloudlet-based mobile cloud computing model for green computing / Gai, K.; Qiu, M.; Zhao, H.; Tao, L. and Zong, Z. // Elsevier, *Journal of Network and Computer Applications*, 59, pp.46-54, Jan.2016.
6. Yonghong, F. A dormant multi-controller model for software defined networking / Yonghong, F.; Jun, B.; Jianping, W.; Ze, C.; Ke, W. and Min, L. // *China Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 45–55, Mar. 2014.
7. Farshin, A. A chaotic grey wolf controller allocator for Software Defined Mobile Network (SDMN) for 5th generation of cloud-based cellular systems (5G) / Farshin, A. and Sharifian, S. // *Computer Communications*, vol. 108, pp. 94–109, Aug. 2017.
8. Muhizi, S. Analysis and performance evaluation of SDN queue model / Muhizi, S.; Shamshin, G.; Muthanna, A.; Kirichek, R.; Vladyko, A. and Koucheryavy, A. // In Proc. International Conference on Wired/Wireless Internet Communication, Springer, Cham, Jun 2017, pp. 26–37.

Received (Надійшла) 17.12.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.02.2023

Modelling of the transaction processing process in a Tactile Internet environment

Andriy Kovalenko, Roman Yaroshevych

Abstract. Topicality. Tactile Internet is one of the main technologies that determines the next evolution of the Internet, which allows you to transmit tactile sensations in real time. A transaction is at the core of the communication and service process in the Tactile Internet and is used to transfer data between different nodes in the network. By modeling the transaction processing process in the Tactile Internet environment, you can predict the performance of the work under different scenarios and identify areas for further improvement. This will make it possible to ensure reliability and availability, as well as low latency in the nodes of the Tactile Internet network. **The goal of this work** is to model the process of processing transactions to ensure reliability, availability and low latency during data transmission in the Tactile Internet environment. **The object of research** is the process of processing transactions in the Tactile Internet environment. **The subject of research** is methods of optimizing the Tactile Internet architecture. **Results.** This article describes the steps in the transaction processing process in the Tactile Internet environment, including data collection, analysis, and generation of control commands. The main components of the Tactile Internet architecture, namely host, slave, and network domains, are reviewed, and the use of software-configurable networks is proposed to manage network traffic and improve the performance of the Tactile Internet network. In addition, the issues of scaling resources based on the three-level architecture of the Tactile Internet and reducing the number of managed intelligent controllers using the OpenFlow protocol are considered. **Conclusions.** The considered model of the transaction processing process in the Tactile Internet environment is capable of providing low-latency tactile feedback and improving network efficiency, which will have a positive impact on user interaction and enable the creation of new applications and scenarios in fields such as medicine, robotics, virtual and augmented reality.

Keywords: Tactile Internet, Cloud Infrastructure, Transaction, Controller, SDN, MEC, NFV, OpenFlow.

Г. Ф. Кривуля, В. В. Токарев, І. В. Ільїна, В. Є. Кравець

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ВЗАЄМОДІЯ МІЖ «S-BOTS» ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» SYSTEM У ФІЗИЧНОМУ НЕОРГАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Анотація. З появою принципово нових «Swarm-bot» systems, з перебудовуваною структурою та програмованою логікою, виникла необхідність урахування факторів, які взаємодіють з фізичним неорганізованим середовищем, збільшенням числа елементів, що входять до їх складу, а також, числом внутрішніх зв'язків. Особливістю нових «Swarm-bot» systems є те, що їх функції, параметри, структури та поведінка при впливі внутрішніх або зовнішніх факторів на різних часових інтервалах життєвого циклу можуть змінюватися або програмним, або апаратним способом. В даний час доведено, що вирішення складних завдань є більш ефективним тоді, коли застосовуються «Swarm-bot» systems в цілому, а не окремі елементи, що входять до їх складу, наприклад, окремі «s-bots», так як при застосуванні «Swarm-bot» systems значно збільшується радіус дії за рахунок розосередження «s-bots», що входять до складу цієї «Swarm-bot» system по всій заданій поверхні, що значно підвищує шанси покрити всю поверхню без зон пропуску (так званих сліпих зон), у яких Drones не зможуть здійснити комунікацію між собою. Ця стаття присвячена вирішенню задачі покриття заданої поверхні регулярними багатокунниками, вписаними в коло.

Ключові слова: «Swarm-bots» system, «s-bot», embedded systems, локальна взаємодія, комунікація, система обробки інформації, система формування команд.

Вступ

З появою нових архітектур різного призначення, стали з'являтися принципово нові «Swarm-bot» systems зі структурою, що перебудовується, і програмованою логікою. Це пов'язано з різноманітністю інформаційних потоків, проектуванням принципово нових інтелектуальних систем управління, що вбудовуються, в таких областях, як оборонна промисловість; зелена енергетика; робототехніка; біомедична інженерія і т.д.

Ускладнення нових «Swarm-bot» систем викликано необхідністю обліку факторів, які взаємодіють з фізичним неорганізованим середовищем, збільшенням числа елементів, що входять до їх складу, а також, числом внутрішніх зв'язків. Особливістю нових «Swarm-bot» systems є те, що їх функції; параметри; структури; поведінка при впливі внутрішніх або зовнішніх факторів на різних часових інтервалах життєвого циклу можуть змінюватися, або програмним, або апаратним засобами.

На практиці може виникнути ситуація, за якої потрібні будь-які зміни в структурній динаміці різної природи або реконфігурація архітектурних рішень «Swarm-bot» system. У разі виникнення вище вказаних ситуацій, забезпечення наступних факторів, таких як надійність; живучість; катастрофостійкість «Swarm-bot» systems в цілому та їх елементів окремо, для виконання запрограмованих функцій на якомусь із етапів життєвого циклу є одним із актуальних стратегічних напрямків розвитку нових технічних систем [1].

Опис проблеми у загальному вигляді

В даний час науково обґрунтовано, що вирішення складних завдань є більш ефективним тоді, коли застосовуються «Swarm-bot» systems в цілому, а не окремі елементи, що входять до їх складу,

наприклад, окремі «s-bots». Тоді, при застосуванні «Swarm-bot» systems значно збільшується радіус дії за рахунок розосередження «s-bots», що входять до складу цієї «Swarm-bot» system, по всій поверхні. Це значно підвищує шанси досягти поставленої мети – покрити задану поверхню бездротовою мережею, для забезпечення ефективної комунікації [2]. Коли «s-bots» однієї «Swarm-bot» system спільно виконують якесь завдання, між ними виникає взаємодія. Методи вирішення задачі взаємодії показано на рис.1.

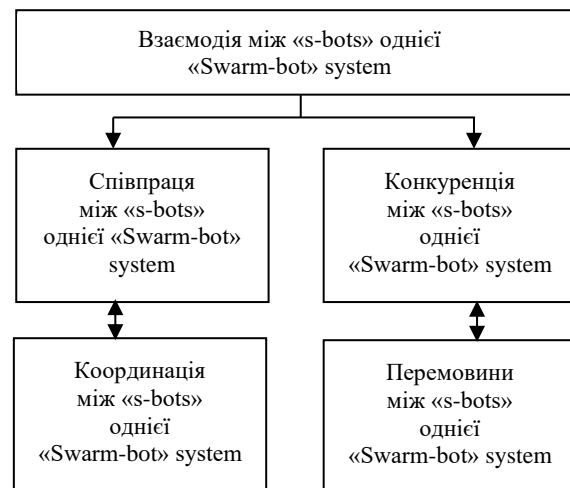


Рис. 1 - Схема вирішення завдань взаємодії

У процесі виконання завдання взаємодії, перший крок – це етап планування, тобто визначення, які задачі мають бути виконані, наприклад, коли виконується рятувальна операція, а саме:

- задача №1 дослідження зони пошуку;
- задача №2 виконання пошуку цілей;
- задача №3 діагностика виявлених цілей;
- задача №4 виконання евакуації цілей.

Другий крок - це розподіл за якимось алгоритмом підзавдань між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system для досягнення спочатку поставленої задачі, а потім - глобальної мети.

При виконанні завдань виявлення цілей, евакуації в одній «Swarm-bot» system між «s-bots», щоб не виникла конкуренція, застосовуються спеціальні алгоритми розподілу підзадач між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system з використанням переговорів на локальному рівні. Третій крок - це планування траєкторій руху «s-bots».

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У наукових роботах Barcis A., Blender T., Dhanaraj N., показано, що один інтелектуальний мобільний «s-bot» не завжди може ефективно виконати завдання однієї «Swarm-bot» system, зокрема, через невеликий, як правило, радіус дії, обмежений енергетичний ресурс, обмежену кількість операцій, які він здатний виконувати, і, нарешті, невисоку ймовірність досягнення мети в екстремальних умовах, пов'язаних із можливістю виходу з ладу одного інтелектуального мобільного «s-bot» [3-5].

Колективом дослідників Barabash O., Serkov A., опубліковані результати, які показують, що при появі зовнішніх або внутрішніх деструктивних впливів на «Swarm-bot» systems найбільш ефективним рішенням для підвищення живучості є застосування одночасно групи інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять в одну «Swarm-bot» system. Застосування такої складної системи дозволяє:

- збільшити радіус дії за рахунок розосередження інтелектуальних мобільних «s-bots» по всій робочій площині;
- розширити набір функцій, які можуть бути виконані;
- забезпечити більш високу ймовірність вирішення поставленого завдання, за рахунок підвищення функціональної стійкості «Swarm-bot» systems [6-9].

Провідними вченими Vagnato A, Arvin F., Nagarajan M. опубліковані роботи, в яких представлений матеріал, який показує, що при використанні інтелектуальних мобільних «s-bots», оснащених автономною системою пересування та навігації та здатних до виконання певних функцій, виникають складні завдання, пов'язані насамперед із проблемою управління такими засобами та організацією колективної їх взаємодії для найбільш ефективного досягнення поставленого завдання [10- 14].

Постановка завдання дослідження

Проблемі взаємодії між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system приділяється багато часу, тому що це одне з найбільш важливих завдань, рішення якого необхідне для досягнення глобальної мети, а саме - для успішного функціонування "Swarm-bot" system в режимі реального часу і яка повинна забезпечувати:

- обмін даними між «s-bots» «Swarm-bot» system;
- локальні перемовини між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system;
- виконання перерозподілу підзадач між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system.

На рис. 2 показано існуючі методи взаємодії. В даний час ці методи використовуються для створення високоефективних платформ комунікації між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system. Для створення високоефективних платформ комунікації між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system необхідно вирішити вузькоспеціалізоване завдання розрахунку покриття заданої поверхні бездротовою мережею, для забезпечення ефективної комунікації. Комунікація виконується із застосуванням Drones, які виступають у ролі "s-bots" однієї "Swarm-bot" system. Завдання полягає в тому, щоб розподілити Drones однієї Swarm-bot system так, щоб вони покрили всю задану поверхню. Принцип покриття заданої поверхні полягає в наступному. У статичному стані Drones однієї «Swarm-bot» system повинні покривати всю задану поверхню без зон пропуску (так званих сліпих зон), в яких Drones не зможуть здійснити комунікацію між собою. Області з великою зоною перекриття (повтореннями) мають бути мінімізовані з метою економії ресурсів Drones. Загальні області покриття Drones повинні відповідати певним обмеженням для забезпечення можливості передачі необхідних даних.

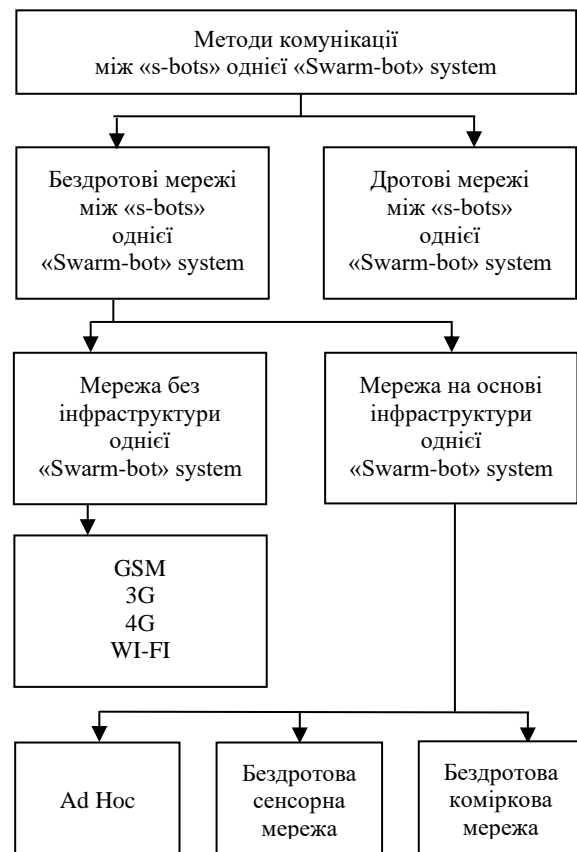


Рис. 2 - Існуючі методи взаємодії.

Пропонований алгоритм вирішення поставленого завдання

Щоб Drones однієї «Swarm-bot» system змогли виконати ефективну комунікацію між собою у фізичному неорганізованому середовищі за умови, що буде задіяно мінімальна кількість Drones однієї «Swarm-bot» system, пропонується виконати поділ заданої поверхні на багатокутники (або багатогран-

ники у тривимірному випадку), тобто здійснити покриття заданої поверхні регулярними багатокутниками, вписаними у кола. Введемо позначення. Нехай k - це вершини багатокутників, за допомогою яких буде виконано покриття заданої поверхні. Припустимо, що якась кількість d цих багатокутників мають загальну вершину. Тоді:

$$d \frac{(k-2) \cdot \pi}{k} = 2\pi, \quad (1)$$

де d та k - позитивні цілі числа, $d > 2$, та $k > 2$. Тоді, отримаємо рівняння, обмежене нерівностями:

$$d > 2; k > 2; d \frac{(k-2) \cdot \pi}{k} = 2\pi. \quad (2)$$

Розв'язавши рівняння за формулою (2) отримаємо:

$$\begin{cases} d=6, k=3; \\ d=4, k=4; \\ d=3, k=6. \end{cases}$$

Це означає, що існують три варіанти покриття заданої площини одними і тими ж багатокутниками. Якщо покрити площину колами одного радіусу з вписаними багатокутниками, що мають k вершин тоді відношення T загальної площі двох суміжних кіл до площі одного кола дорівнює:

$$T = 2 \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{k} \right) r^2 - \frac{1}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{k} \right) r^2}{\pi r^2}, \quad (3)$$

Підставивши отримані значення $k=3,4,6$ при розв'язанні рівняння за формулою (2) отримаємо:

$$\begin{cases} k=6, T=5.68\% \\ k=4, T=19.17\% \\ k=3, T=38.8\% \end{cases}$$

На рис. 3 показано кола з різними вписаними у них фігурами, тобто різними вписаними багатокутниками, для виконання процедури покриття заданої поверхні. Як видно з проведених розрахунків, для того, щоб мінімальна кількість Drones однієї «Swarm-bot» system покрили всю задану поверхню у фізичному неорганізованому середовищі без зон пропуску (так званих сліпих зон), для зменшення повторень оптимальний варіант представлений на рис. 3, в (коло з вписаним багатокутником, коли $k = 6$ та $T = 5.68\%$).

Проведемо імітаційне моделювання у середовищі Matlab 7. Наприклад, нехай існує якась кількість R_{Drones} однієї «Swarm-bot» system, у яких радіус покриття складає $r = 100$ і покривають задану прямокутну поверхню $M \times N$, де $M = 2000$, $N = 1000$. Необхідно знайти мінімальну кількість R_{Drones_min} однієї «Swarm-bot» system, щоб вони покрили всю задану прямокутну поверхню за допомогою фігури, представленої на рис. 3, в.

Будемо використовувати декартову систему координат OXY . Тоді кількість $R_{X-Drones}$ вздовж осі

абсцис OX можна обчислити за формулою:

$$1.5r \cdot (R_{X-Drones} - 1) + r = 2000, \quad (4)$$

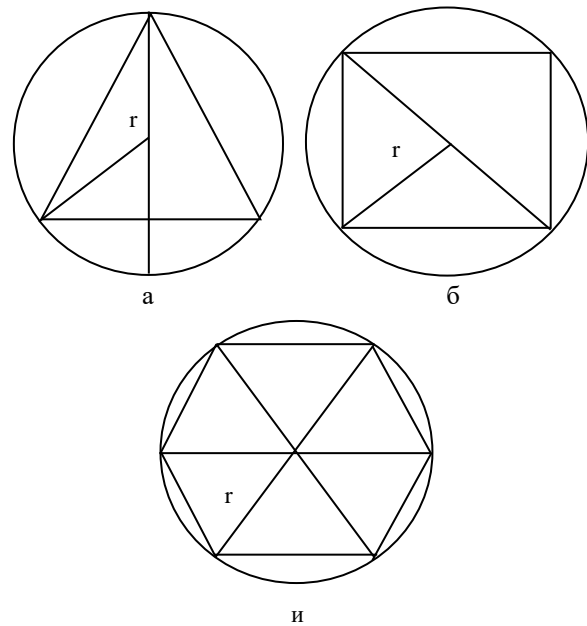


Рис. 3 - Коло з вписаним багатокутником, коли: $k = 3$ (а), $k = 4$ (б), $k = 6$ (в),

Розв'язавши рівняння за формулою (4), отримаємо $R_{X-Drones} = 13.67$. Кількість $R_{Y-Drones}$ вздовж осі ординат OY можна обчислити за формулою:

$$\sqrt{3}r \cdot (R_{Y-Drones}) = 1000, \quad (5)$$

Розв'язавши рівняння за формулою (5), отримаємо $R_{Y-Drones} = 5.774$. Округливши значення, отримаємо:

$$R_{X-Drones} = 14; R_{Y-Drones} = 6.$$

Виконавши обчислення, отримуємо, що ще сім ділянок заданої прямокутної поверхні залишилися у сліпій зоні. Тоді мінімальна необхідна кількість R_{Drones} «Swarm-bot» system можна обчислити як

$$R_{Drones} = R_{X-Drones} \cdot R_{Y-Drones} + 7, \quad (6)$$

Виконавши обчислення, отримуємо:

$$R_{Drones_min} = 91.$$

Координати центрів кола, представленого на рис. 3, в, можна обчислити за формулою:

$$x_i = \frac{r}{2} + 1.5r \cdot (i-1); \quad y_j = \sqrt{3}r \cdot (j-1), \quad (7)$$

де $i=1,2,3,\dots,14$; $j=1,2,3,\dots,7$.

Висновки

Для створення високоєфективних платформ комунікації між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system у статті вирішується вузькоспеціалізоване завдання розрахунку покриття заданої поверхні бездротовою мережею, для забезпечення ефективної комунікації. Комунікація виконується із застосуванням Drones, які виступають у ролі «s-bots» однієї «Swarm-bot» system.

Завдання полягає в тому, щоб розподілити Drones однієї «Swarm-bot» system так, щоб вони покрили всю задану поверхню. У роботі пропонується здійснити покриття заданої поверхні регулярними багатокутниками, вписаними в кола. Були проведені математичні розрахунки, які показали, що для того, щоб мінімальна кількість Drones однієї Swarm-bot system покрили всю задану поверхню у фізичному неорганізованому середовищі без зон пропуску (так званих сліпих зон), для зменшення повторень оптимальним варіантом є коло з вписаним до нього шестикутником.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що застосування такої геометричної фігури дозволить повністю покрити задану поверхню без зон пропуску. Було проведено імітаційне моделювання в середовищі Matlab 7. Отримані результати показали, що для того, щоб здійснити ефективну взаємодію між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system необхідно $R_{Drones_min} = 91$. Передбачається продовжити дослідження у цьому напрямі, оскільки на сьогоднішній день воно є одним із актуальних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. G. Krivoulya, V. Tokariiev, I. Ilina, O. Lebediev, V. Shcherbak. Algorithm of Iterations of Distribution of Subtasks Between «S-Bot» in One «Swarm-Bot» System // Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2022). CEUR Workshop Proc., 12-13 may. 2022. - Gliwice, Poland, 2022. - P. 1531-1541
2. G. Krivoulya, I. Ilina, V. Tokariiev, V. Shcherbak. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic // IEEE Int. S.-P. Conf. Problems of Infocommunications, Science and Technology: (PIC S&T), 06-09 oct. 2020y. - Kharkiv, 2020. - P.573 - 576.
3. Barcis A., Barcis M., and Bettstetter C. Robots that sync and swarm: a proof of concept in ROS 2 // in Proceedings of the International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (New Brunswick, NJ: IEEE), 2019. P.98–104.
4. Blender T., Buchner T., Fernandez B., Pichlmaier B., and Schlegel C. Managing a mobile agricultural robot swarm for a seeding task // IEEE Industrial Electronics Society (Florence), 2019. P.6879–6886. Doi: 10.1109/IECON.2016.7793638.
5. Dhanaraj N., Hewitt N., Edmonds-Estes C., Jarman R., Seo J., Gunner H., et al. Adaptable platform for interactive swarm robotics (apis): a human-swarm interaction research testbed // in Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Robotics (Belo Horizonte), 2019. P.720–726. Doi: 10.1109/ICAR46387.2019.8981628.
6. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariiev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles // The 10th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019), 5-7 june, 2019 y. - Leeds, 2019. - P.26 - 29.
7. Serkov A., Pustovoitov P., Yakovenko I., Lazurenko B., Churyumov G., Tokariiev V., Nannan. W. Ultra wideband technologies in mobile object management systems / Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - С.22-27.
8. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Kravets V. 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>.
9. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширокосмугові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів // Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (EMC-2019), 24 жовт. 2019 р. - Харків, 2019. - С. 55-57.
10. Bagnato A., Biro R. K., Bonino D., Pastrone C., Elmenreich W., Reiners R., et al. Designing swarms of cyber-physical systems: the H2020 CP Swarm project: invited paper // in Proceedings of the Computing Frontiers Conference (New York, NY: Association for Computing Machinery), 2017. P.305–312. Doi: 10.1145/3075564.3077628.
11. Arvin F., Watson S., Turgut A. E., Espinosa J., Krajník T., and Lennox B. Perpetual robot swarm: long-term autonomy of mobile robots using on-the-fly inductive charging. J. Intell. Robot. Syst. 2017. Vol.92. P.1–18. Doi: 10.1007/s10846-017-0673-8.
12. Arvin F., Espinosa J., Bird B., West A., Watson S., and Lennox. An affordable open-source mobile robot for education and research // J. Intell. Robot. Syst. 2019. Vol.94 P.761–775. Doi: 10.1007/s10846-018-0866-9.
13. Albani D., Manoni T., Arik A., Nardi D., and Trianni V. Field coverage for weed mapping: toward experiments with a UAV swarm // in Proceedings of the 11th EAI International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies (Cham). 2019. P.1–16. Doi: 10.1007/978-3-030-24202-2_10.
14. Narayan M. H., and Tuci E. Cooperative object transport with a swarm of e-puck robots. Robustness and scalability of evolved collective strategies // Swarm Intell. 2017. Vol. 11. P.185–209. Doi: 10.1007/s11721-017-0135-8.

Received (Надійшла) 23.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.02.2023

Interaction between «s-bots» one «Swarm-bot» system in a physical unorganized environment

G. Krivoulya, V. Tokariiev, I. Ilina, V. Kravets

Abstract. With the advent fundamentally new «Swarm-bot» systems, with a tunable structure and programmable logic, it became necessary to take into account the factors that interact with physical unorganized environment, an increase in the number of their constituent elements, as well as the number of internal bonds. A feature of the new «Swarm-bot» systems is that their functions, parameters, structures and behavior under the influence of internal or external factors at different time intervals of the life cycle can change, either in software or in hardware. It has now been proven that solving complex problems is more effective when «Swarm-bot» systems are used as a whole, and not individual elements that make up them, for example, individual «s-bots», since when using «Swarm-bot» systems significantly increases the range due to the dispersion of «s-bots» that are part of this «Swarm-bot» system over the entire given surface, which significantly increases the chances cover all surface without pass zones (the so-called blind zones), in which Drones unable to communicate with each other. This article is about solving the problem of covering a given surfaces regular polygons inscribed in circles.

Keywords: «Swarm-bot» system, «s-bots», embedded systems, local interaction, communication, information processing system, command formation system

В. В. Міхав, Є. В. Мелешко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

МЕТОД РОБОТИ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ У КОМП'ЮТЕРНІЙ МЕРЕЖІ ТИПУ PEER TO PEER

Анотація. Стаття присвячена розробці методу роботи рекомендаційних систем в однорангових децентралізованих комп'ютерних мережах. Існує велика кількість методів роботи рекомендаційних систем для веб-сайтів та застосунків, призначених для централізованих комп'ютерних мереж. В той же час дослідження децентралізованих однорангових мереж показало, що питання створення рекомендаційних систем для такої архітектури практично не розглядалося. Проведено дослідження методів роботи однорангових децентралізованих структурованих комп'ютерних мереж, наведено узагальнені принципи їх роботи. Запропоновано метод роботи рекомендаційної системи на основі колаборативної фільтрації для однорангової децентралізованої структурованої комп'ютерної мережі з адресацією на основі розподілених хеш-таблиць. Для представлення даних рекомендаційної системи було використано дві структури даних: розгорнуті зв'язні списки та хеш-таблиці з відкритою адресацією. Використовувалося два типи розгорнутих списків: асоційовані з користувачами – містили списки вподобаних ними об'єктів та асоційовані з об'єктами – містили списки користувачів, які вподобали відповідні об'єкти. Кожен комп'ютер децентралізованої комп'ютерної мережі містив список вподобань асоційований зі своїм користувачем та списки вподобань асоційовані з об'єктами, які на ньому розташовані. Доступ до відсутньої на поточному комп'ютері інформації здійснювався за допомогою запитів до інших комп'ютерів за відповідними ідентифікаторами, організованими розподіленою хеш-таблицею однорангової децентралізованої мережі. Проведено експериментальне дослідження запропонованого методу роботи рекомендаційної системи. Воно показало, що розроблений метод має досить високі показники точності (Precision) та низьку середньоквадратичну помилку. Недоліком розробленого методу є низькі показники повноти (Recall), що виникає через те, що метод часто робить помилкові негативні прогнози. Це жодним чином не впливає на точність рекомендацій, тому що об'єкти з негативним прогнозом вподобань не потрапляють до списку рекомендацій. Але це погіршує наповненість списків, адже багато елементів, які можна було додати до них, відсіюються.

Ключові слова: рекомендаційні системи, колаборативна фільтрація, комп'ютерні мережі, однорангові мережі, децентралізовані мережі, розподілені хеш-таблиці.

Вступ

Рекомендаційні системи стали звичним та важливим елементом сучасних контент-орієнтованих веб-сайтів та соціальних мереж [1, 2].

Існує велика кількість методів роботи рекомендаційних систем для веб-сайтів та застосунків, призначених для централізованих комп'ютерних мереж. В той же час дослідження децентралізованих однорангових мереж показало, що питання створення рекомендаційних систем для такої архітектури практично майже не розглядалося [3-11].

Хоча в peer to peer мережах дуже гостро стоїть питання інформаційного пошуку, а рекомендаційні системи з різними алгоритмами фільтрації даних якраз могли б значно полегшити користувачам пошук корисного для них контенту та збільшили б інтерес до однорангових мереж для розподіленого зберігання контенту.

В деяких видах peer to peer мереж класичні методи роботи рекомендаційних систем не зможуть працювати без певної адаптації та змін внаслідок особливостей архітектури цих мереж.

Методи організації P2P мереж можна розділити на наступні три види [3-13]:

– Централізовані однорангові мережі, наприклад, BitTorrent [12].

– Неструктуровані децентралізовані однорангові мережі, цей тип мереж використовує алгоритм пошуку Flooding, типовий представник – Gnutella [13].

– Структуровані децентралізовані однорангові мережі, найчастіше будуються на основі розподілених хеш-таблиць, наприклад, на основі алгоритму Kademia [10] або Chord [11].

Для централізованих однорангових мереж можливе застосування стандартних методів побудови рекомендаційних систем, оскільки у таких мережах є сервер, що зберігає посилання на файли та статистику. Складнощі виникають при намаганні створити рекомендаційні системи для децентралізованих однорангових мереж, тому що треба враховувати їх архітектуру і адаптувати відомі методи та підходи до неї. Зокрема, в децентралізованих мережах уся інформація розподілена по усім комп'ютерам мережі (це і файли, і таблиці маршрутизації, і статистика тощо), тому виникає проблема збору інформації для рекомендаційної системи та розгляд можливості зібрати не всю інформацію, а мінімально потрібну, щоб не опитувати всі комп'ютери у мережі.

У цій роботі було запропоновано метод роботи рекомендаційної системи для однорангової децентралізованої структурованої комп'ютерної мережі, побудованої з застосуванням розподілених хеш-таблиць. Було вирішено розглядати саме структуровані децентралізовані мережі, так як на відміну від неструктурованих вони гарантують знаходження файлу, наявного у даний момент часу у мережі. А неструктуровані децентралізовані мережі знаходять наявний файл тільки з деякою ймовірністю, тому менше підходять для якісного розподіленого зберігання та обміну файлами.

1. Дослідження загальних принципів роботи однорангових децентралізованих структурованих комп'ютерних мереж

Розглянемо принципи роботи однорангових децентралізованих структурованих комп'ютерних мереж. Найчастіше для індексації та маршрутизації вони використовують розподілені хеш-таблиці (Distributed hash table, DHT). Для простоти будемо називати далі такі комп'ютерні мережі – P2P DHT мережі.

Узагальнені принципи роботи P2P DHT мереж наступні [3-5, 10, 11]:

1. *Ідентифікатори комп'ютерів.* Комп'ютери мають ідентифікатори $h \in H$, що змінюються у діапазоні $[0, 2^m-1]$. Вони визначається деякою хеш-функцією або залежить від черговості підключення комп'ютерів до мережі. Наприклад, 1-й комп'ютер у мережі отримує ідентифікатор $h_0=0$. i -тий комп'ютер одержує ідентифікатор $h_i=i$ або один з вільних ідентифікаторів, що звільнилися внаслідок виходу з мережі деяких комп'ютерів, що раніше були приєднані. Оскільки в децентралізованих мережах комп'ютери можуть приєднуватися та від'єднуватися від мережі, тобто, учасники постійно змінюються, задача виявлення уже невикористовуваних індексів і надання їх новим комп'ютерам є важливою та по-різному вирішується у різних алгоритмах. Як правило, не тільки при приєднанні нового комп'ютера до мережі, а й з деякою періодичністю відбувається перевірка доступності вузлів та оновлення таблиць маршрутизації.

2. *Ідентифікатори файлів.* Файли також мають

ідентифікатори $h \in H$, що змінюються у такому ж діапазоні як i у комп'ютерів $[0, 2^m-1]$. Вони визначаються деякою хеш-функцією. Використовується так зване узгоджене хешування, що на відміну від лінійного передбачає зміну в середньому тільки K/n ключів, де K – число ключів, а n – число слотів. Популярним є застосування алгоритму хешування SHA-1 в P2P DHT мережах, в такому разі $m=160$, що дозволяє створити досить велику множину ідентифікаторів.

3. *Зберігання файлів.* Файли чи їх частини (при розподіленому зберіганні) або шляхи до них (при розподіленому індексуванні) зберігаються на комп'ютерах таким чином, щоб ідентифікатор комп'ютера та ідентифікатор файлу (його частини) співпадали. Або, при відсутності у мережі комп'ютера з потрібним ідентифікатором, вони повинні бути максимально близькі з наявних варіантів за деякою метрикою відстані. Надалі для простоти будемо розглядати розподілене зберігання файлів. Для забезпечення надійності зберігання інформації кожен файл дублюють на декілька комп'ютерів, для цього обирається q наявних у мережі комп'ютерів, ідентифікатори яких найближчі за обраною метрикою відстані до ідентифікатора файлу. При зміні складу учасників мережі, за необхідності, відбувається перерозподіл частини файлів між комп'ютерами.

4. *Таблиця маршрутизації.* Зберігання таблиці маршрутизації також є розподіленим. Кожен комп'ютер містить інформацію потрібну для доступу (мережеві адреси) найближчих N сусідів $X = \{x_{i-n}, \dots, x_{i+n}\}$ рис. 1.

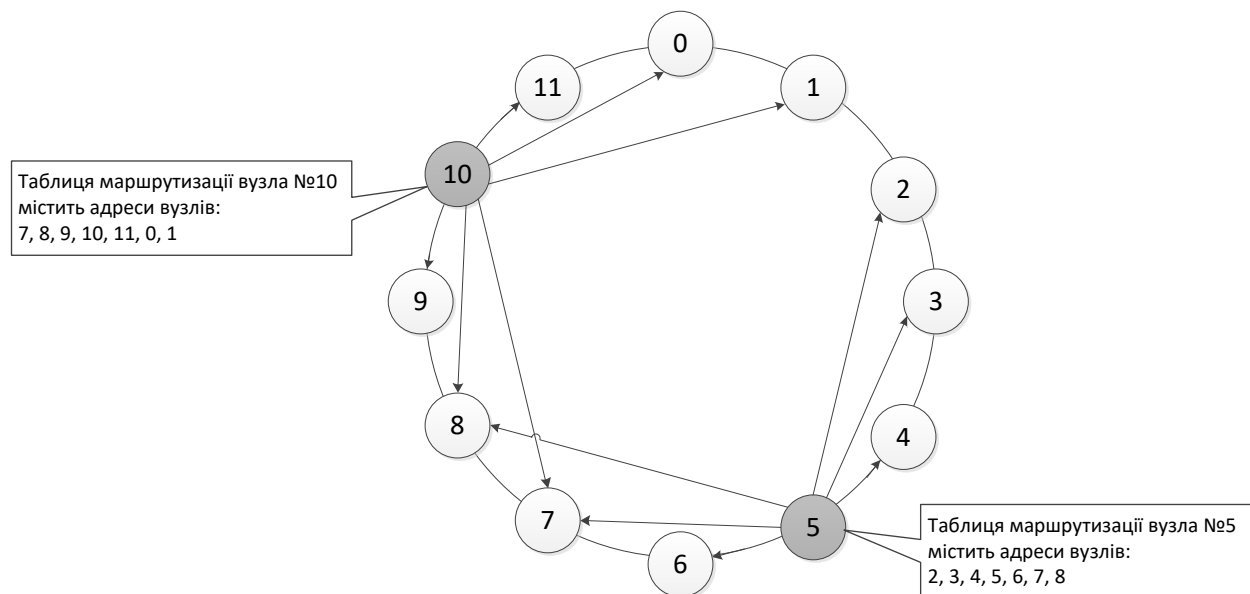


Рис. 1. Схематичне зображення принципу наповнення таблиць маршрутизації в однорангових децентралізованих структурованих комп'ютерних мережах: таблиці маршрутизації показані для комп'ютерів №5 та №10 при зберіганні 6 найближчих сусідів у мережі з 12 вузлів за принципами алгоритму Chord

Визначення множини X , а також розмір N цієї множини, у кожному конкретному методі здійснюється по-різному.

Наприклад, в алгоритмі Chord [11] таблиця маршрутизації комп'ютера містить $2r+1$ записи, тобто

інформацію про сам комп'ютер, а також про r комп'ютерів, що мають найближчі менші номери серед наявних у мережі комп'ютерів, та про r комп'ютерів, що мають найближчі більші номери серед наявних комп'ютерів.

Комп'ютери об'єднуються в кільце, тобто, останній комп'ютер посилається на перший. Що викликає можливі проблеми з неправильним замиканням кільця, виникненням декількох кілець та розривом кільця при помилках в оновленні таблиць маршрутизації. В алгоритмі Kademia [10] таблиця маршрутизації зберігається у вигляді так званих K-bucket-ів. У кожному K-bucket-ті вузла зберігається інформація про K вузлів мережі, чия відстань до нього знаходиться в межах інтервалу $[2^i, 2^{(i+1)})$, у якості метрики відстані використовується операція XOR. Якщо, наприклад, для створення ідентифікаторів застосовується хеш-функція SHA-1, то кількість K-bucket-ів на кожному вузлі буде 160. K – загально-системне число, наприклад 20. Кожен K-bucket – це список, що містить не більше K -записів; тобто для мережі з $K=20$ кожен вузол матиме списки, що містять до 20 вузлів для певної відстані від себе. На практиці виходить, що кожен вузол зберігає інформацію про вузли, з якими будь-коли взаємодіяв, протягом певного часу (наприклад, час життя запиту 24 години). Таким чином розмір таблиці маршрутизації змінюється динамічно, а деякі K-bucket-ти будуть порожніми в деякий момент часу.

5. *Пошук файлів.* Файли у мережі шукаються за їх хеш-значеннями. Комп'ютер, який здійснює пошук файлу, вибирає в своїй таблиці маршрутизації j комп'ютерів, ідентифікатори яких найближчі за обраною метрикою відстані до ідентифікатора шуканого файлу. Кожен комп'ютер з множини вибраних $S = \{s_0, s_1, \dots, s_j\}$ перевіряє чи міститься безпосередньо на ньому шуканий файл, і якщо ні, то пересилає пошукове повідомлення уже j найпідходящим комп'ютерам зі своєї таблиці маршрутизації, і так поки файл не буде знайдений. Чим більше значення s , тим менша ймовірність відмови та вищий рівень інформаційної безпеки, але й вище навантаження на мережу. Можна було б пересилати запит тільки на один комп'ютер з найближчим до шуканого ідентифікатором, але може виявитися, що він на даний час відсутній у мережі. Або ж цим комп'ютером володіє зловмисник, що перенаправить запит не на пошук та завантаження потрібного файлу, а на завантаження вірусу, в той же час при направленні запиту на декілька комп'ютерів можна буде обрати ту відповідь, яка прийде від більшості, що значно зменшить ймовірність інформаційної атаки.

6. *Основні запити до мережі.* Методи роботи P2P DHT мереж повинні містити також наступні функції:

- Перевірка наявності сусідніх вузлів у мережі для оновлення таблиць маршрутизації;
- Пошук вузлів за ідентифікатором;
- Пошук файлів за ідентифікатором.

Зокрема, в протоколі алгоритму Kademia для їх реалізації наявні наступні 4 типи запитів:

- 1) PING – необхідний для перевірки існування конкретного вузла у мережі;
- 2) STORE дає змогу розмістити інформацію на заданому вузлі;
- 3) FIND_VALUE – дозволяє знайти значення за ключем;

4) FIND_NODE – використовується для пошуку найближчих K вузлів до заданого ідентифікатора (схожий на FIND_VALUE, тільки ніколи не повертає значення, завжди вузли).

2. Запропонований метод роботи рекомендаційної системи у однорангових децентралізованих структурованих мережах

З врахуванням особливостей архітектури P2P DHT мереж було запропоновано метод роботи рекомендаційних систем для них.

Для реалізації рекомендаційної системи у P2P DHT мережі найкраще підійдуть підходи засновані на колаборативній фільтрації, адже для неї достатньо знати тільки реакцію користувача на контент, що може бути представлена оцінками, лайками або самим фактом завантажень файлів.

Вміст файлів, їх назви та інформацію про користувачів знати не обов'язково.

Таким чином можна працювати лише з ідентифікаторами файлів, ідентифікаторами користувачів та статистикою завантаження файлів, це все можна отримати при роботі з децентралізованою структурованою одноранговою комп'ютерною мережею.

Для представлення даних рекомендаційної системи у пам'яті було використано дві структури даних: розгорнуті зв'язні списки та хеш-таблиці із відкритою адресацією.

Розгорнуті зв'язні списки були обрані після проведення експерименту з використанням програмної імітаційної моделі, де тестувалися різні методи зберігання даних рекомендаційної системи [14]. Хеш-таблиці обрані для проміжних обчислень.

Розгорнутий зв'язний список – це зв'язний список, який складається із блоків з наперед визначеною кількістю елементів.

Така структура дає можливість поєднати ефективно розширення зв'язних списків та переваги послідовного доступу до елементів блоку. Було використано цю структуру даних для збереження інформації про вподобання користувачів.

Використовувалося два типи списків:

- 1) асоційовані з користувачем – містять список об'єктів, які він вподобав;
- 2) асоційовані з об'єктом – містять список користувачів, які вподобали цей об'єкт.

Таким чином, використовуються дві копії інформації про вподобання, що збільшує витрати пам'яті, але дає можливість уникати перегляду усіх вподобань для генерації рекомендації та дає можливість врахувати архітектуру P2P DHT мереж. Зокрема, кожен комп'ютер може містити список вподобань асоційований зі своїм користувачем та списки вподобань асоційовані з об'єктами, які на ньому розташовані. Ця інформація доступна для збору кожному комп'ютеру, для цього треба тільки зберігати статистику дій відповідного користувача та статистику завантажень наявних файлів.

В такому разі під вподобанням буде розумітися факт завантаження файлу. Якщо впровадити у P2P DHT мережу можливість оцінювання файлів, схема буде трохи складнішою.

Доступ до потрібної інформації, яка не розміщена на комп'ютері користувача, якому треба сформулювати рекомендації, може бути отримана запитами до інших комп'ютерів за ідентифікаторами, організованими розподіленою хеш-таблицею P2P DHT мережі.

Також було використано хеш-таблиці з відкритою адресацією для збереження проміжних значень, необхідних для генерації рекомендацій, в тому числі для підрахунку кількості входжень елементів. Для цього було реалізовано операцію інкременту, яка працює наступним чином:

1. Здійснюється пошук елемента за ключем.
2. Якщо елемент не існує, створюється новий елемент зі значенням 1.
3. Якщо елемент існує і має значення -1, то його значення не змінюється, інакше – збільшується на 1.

Такий підхід дає можливість заборонити інкрементувати певні елементи.

Запропонований метод роботи рекомендаційної системи складається з наступних етапів:

Етап 1. Створити хеш-таблицю з ідентифікаторами користувачів H_u та хеш-таблицю з ідентифікаторами об'єктів H_f . Одержати доступ до розгорнутих списків, асоційованих з користувачами L_u та асоційованих з об'єктами L_f , що містять історію дій (завантаження/вподобання).

Етап 2. Переглянути список вподобань L_{u0} користувача U_0 , для якого треба створити рекомендації. Для кожного вподобаного користувачем U_0 об'єкту створити у хеш-таблиці об'єктів H_f елемент зі значенням -1.

Етап 3. Для кожного користувача, який вподобав один з об'єктів, що в H_f мають значення -1, інкрементувати відповідний елемент у хеш-таблиці H_u .

Етап 4. Для кожного користувача U_i з хеш-таблиці користувачів H_u , елемент якого не містить -1, переглянути відповідний список вподобань L_{ui} та інкрементувати елементи у хеш-таблиці об'єктів H_f , якщо деякий користувач вподобав відповідний об'єкт.

Етап 5. Створити масив M_{rec} для збереження списку рекомендацій. Для кожного елемента з хеш-таблиці об'єктів H_f , значення якого не -1, здійснити спробу вставити цей елемент до масиву M_{rec} у порядку спадання значень. Обрати $TopN$ рекомендацій з масиву M_{rec} для показу користувачу U_0 .

На початку роботи запропонований метод позначає цільового користувача U_0 (якому треба сформулювати рекомендації) як недоступного для участі у проміжних обчисленнях, шляхом занесення у хеш-таблицю користувачів елемента, ключ якого – це ідентифікатор цього користувача, а значення дорівнює -1.

Після цього виконується обхід списку вподобань цільового користувача. Кожен вподобаний об'єкт заноситься до хеш-таблиці об'єктів зі значенням -1, щоб уникнути повторної рекомендації уже вподобаних об'єктів.

Якщо система допускає повторні рекомендації, то цей етап може бути змінений.

Далі для кожного вподобаного об'єкту вибирається список користувачів, які його вподобали.

Для кожного користувача із цього списку

виконується інкрементація відповідного значення у хеш-таблиці користувачів. Це значення буде використано для визначення ступеня подібності користувачів. Після завершення обходу хеш-таблиця користувачів фільтрується, щоб виключити користувачів, вподобання яких не будуть використовуватися при формуванні рекомендації.

Під час наступного етапу виконується обхід усіх елементів хеш-таблиці користувачів. Для кожного з цих користувачів вибирається відповідний список вподобань.

Для кожного елемента з цього списку виконується інкрементація відповідного значення у хеш-таблиці об'єктів. На основі цього значення визначається, чи потрапить об'єкт до рекомендації.

На останньому етапі з хеш-таблиці об'єктів відбираються елементи із найбільшими значеннями та передаються як рекомендації для цільового користувача.

3. Результати експериментів для визначення точності запропонованого методу роботи рекомендаційної системи

Було проведено експериментальне дослідження запропонованого методу роботи рекомендаційної системи в P2P DHT мережі. Результати проведених експериментів наведені у табл. 1.

Для проведення експериментів використовувалася програмна імітаційна модель P2P DHT мережі та дані з датасету MovieLens [15], що переводилися до потрібного формату, зокрема, оцінки для простоти були перетворені на лайки в одній серії експериментів та лайки і дизлайки в іншій серії експериментів.

Були проведені наступні серії експериментів, що відрізнялися способом оцінювання об'єктів у програмній моделі та обробкою результатів:

– факт вподобання користувачем файлу визначався наявністю лайку (або ж інша інтерпретація – фактом завантаження файлу) – експерименти №1-3.

– відношення користувача до файлу визначалося лайками та дизлайками – експерименти №4-6.

– відношення користувача до файлу визначалося лайками та дизлайками, кожен з них множився на коефіцієнт $k=2$ перед запуском розрахунків для формування рекомендацій – експерименти №7-9.

– відношення користувача до файлу визначалося лайками та дизлайками, кожен з них множився на коефіцієнт $k=5$ перед запуском розрахунків для формування рекомендацій – експерименти №10-12.

В межах кожної серії експериментів використовувалися різні розміри списків рекомендацій, а саме, 128, 512 та 1024 об'єкти у списку.

Для оцінки якості роботи рекомендаційної системи використовувалися наступні метрики [16]: Precision (точність), Recall (повнота) та RMSE (середньоквадратична помилка):

$$\text{Precision} = \frac{tp}{tp + fp}, \quad (1)$$

$$\text{Recall (True Positive Rate)} = \frac{tp}{tp + fn}, \quad (2)$$

де tp – результати, в яких позитивний прогноз виявився вірним; fp – результати, в яких позитивний прогноз виявився помилковим; fn – результати, в яких негативний прогноз виявився помилковим.

Таблиця 1 – Результати експериментів для перевірки якості роботи запропонованого методу

№ експ.	Спосіб оцінювання контенту у системі	Кількість об'єктів у списку рекомендацій	Precision (Точність)	Recall (Повнота)	RMSE
1	Тільки лайки (або факт завантаження)	128	0,7605	0,2033	0,5258
2	Тільки лайки (або факт завантаження)	512	0,7160	0,4443	0,4471
3	Тільки лайки (або факт завантаження)	1024	0,6917	0,6074	0,4052
Середнє значення			0,7227	0,4183	0,4593
4	Лайки та дизлайки	128	0,7786	0,2082	0,5199
5	Лайки та дизлайки	512	0,7530	0,4346	0,4324
6	Лайки та дизлайки	1024	0,7382	0,5825	0,3812
Середнє значення			0,7566	0,4084	0,4445
7	Лайки та дизлайки, помножені на $k=2$	128	0,7936	0,1969	0,5219
8	Лайки та дизлайки, помножені на $k=2$	512	0,7820	0,3880	0,4399
9	Лайки та дизлайки, помножені на $k=2$	1024	0,7765	0,4983	0,3941
Середнє значення			0,7840	0,3610	0,4519
10	Лайки та дизлайки, помножені на $k=5$	128	0,8338	0,1507	0,5372
11	Лайки та дизлайки, помножені на $k=5$	512	0,8391	0,2293	0,4976
12	Лайки та дизлайки, помножені на $k=5$	1024	0,8401	0,2529	0,4858
Середнє значення			0,8376	0,2109	0,5068

Також для оцінки якості роботи рекомендаційної системи використовувалася метрика [16] RMSE (середньоквадратична помилка):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{|\tau|} \sum_{(u,i) \in \tau} (\hat{r}_{ui} - r_{ui})^2}, \quad (3)$$

де \hat{r}_{ui} – прогнозовані рейтинги (вподобання) для тестового набору даних τ пар користувач-об'єкт (u, i) ; r_{ui} – справжні рейтинги.

Усі дані з датасету були поділені на робочі та тестові. На основі робочих даних здійснювалися прогнози вподобань користувачів та формувалися списки рекомендацій. На основі тестових даних перевірялася точність рекомендацій за формулами (1)-(3).

Як показали результати експериментів, наведені у табл. 1, точність (Precision) запропонованого методу виявилася досить високою і варіювалася у діапазоні $0,6917 \div 0,8401$ в залежності від обраних параметрів системи. Найкращі результати були отримані, коли була можливість використовувати і лайки, і дизлайки користувачів, а їх значення були помножені на коефіцієнт $k=5$.

Повнота (Recall) розробленого методу, на жаль, виявилася низькою через те, що метод часто робить помилкові негативні прогнози. Це жодним чином не впливає на точність рекомендацій, тому що об'єкти з негативним прогнозом вподобань не потрапляють до списку рекомендацій. Але це погіршує наповненість списків, адже багато елементів, які можна було додати до списків, відсіюються.

Середньоквадратична помилка досить низька, її значення варіювалося у діапазоні $0,3812 \div 0,5372$ і дещо зменшувалася при збільшенні довжини списку рекомендацій.

Висновки

Було запропоновано метод роботи рекомендаційної системи на основі колаборативної фільтрації для однорангової децентралізованої структурованої комп'ютерної мережі з адресацією на основі розподілених хеш-таблиць.

Також було проведено експериментальне дослідження запропонованого методу. Воно показало, що розроблений метод має досить високі показники точності (Precision) від $0,6917$ до $0,8401$ в залежності від

обраних параметрів системи та низьку середньоквадратичну помилку від 0,3812 до 0,5372.

Найкращі результати отримані, коли була можливість використовувати і лайки, і дизлайки користувачів, а їх значення множилися на коефіцієнт $k=5$.

Недоліком розробленого методу є низькі показники повноти (Recall), що виникає через те, що метод

часто робить помилкові негативні прогнози. Це не впливає на точність рекомендацій, але погіршує наповненість списків рекомендацій, адже багато елементів, які можна було додати до них, відсіюються.

Повнотою рекомендацій було пожертвовано для адаптації колаборативної фільтрації до архітектури P2P мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. "Recommender Systems Handbook" (2010) Editors F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira, P. B. Kantor, New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 842 p.
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. Riposo Ju. Diffusion on the Peer-to-Peer Network // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2022. – 100 p.
4. Koo S.G.M. Multimedia Content Distribution Using Peer-to-Peer Overlay Networks: The Design and Analysis of the Next Generation Peer-to-Peer Networks // VDM Verlag Dr. Müller. – 2008. – 88 p.
5. Milojicic D.S., Kalogeraki V., Lukose R., Nagaraja K., Pruney J., Richard B., Rollins S., Xu Z. Peer-to-peer computing // Technical Report HPL-2002-57, HP Labs. – 2002. – 51 p. – URL: <https://www.cs.kau.se/cs/education/courses/dvad02/p2/seminar4/Papers/HPL-2002-57R1.pdf>
6. Zeinalipour-Yazti D., Kalogeraki V., Gunopulos D. Information retrieval techniques for peer-to-peer networks // Computing in Science & Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 20-26. – 2004. – DOI: 10.1109/MCSE.2004.12
7. Lua E.K., Crowcroft J., Pias M., Sharma R., Lim S. A Survey and Comparison of Peer-to-Peer Overlay Network Schemes // IEEE Communications survey and tutorial. – 2004. – URL: <https://snap.stanford.edu/class/cs224w-readings/lu04p2p.pdf>
8. Kalogeraki V., Gunopulos D., Zeinalipour-Yazti D. A Local Search Mechanism for Peer-to-Peer Networks // Proc. of CIKM'02, McLean VA, USA, 2002. – URL: <http://alumni.cs.ucr.edu/~csyiazti/downloads/papers/cikm02/cikm02.pdf>
9. Zeinalipour-Yazti D. Information Retrieval in Peer-to-Peer Systems // M.Sc Thesis, Dept. of Computer Science, University of California Riverside. – 2003. – URL: <http://alumni.cs.ucr.edu/~csyiazti/papers/msc/html/>
10. Kademia: A Design Specification – 2010. – URL: <https://xlattice.sourceforge.net/components/protocol/kademia/specs.html>
11. Stoica I., Morris R., Karger D.R., Kaashoek M.F., Balakrishnan H. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications // ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 31(4). – 2001. DOI: 10.1145/964723.383071
12. The BitTorrent Protocol Specification – 2017. – URL: http://www.bittorrent.org/beps/bep_0003.html
13. Gnutella Protocol Development – 2003. – URL: <https://rfc-gnutella.sourceforge.net>
14. Міхав В.В., Мелешко Є.В., Якименко М.С., Башенко Д.В. Методи зберігання даних рекомендаційної системи на основі зв'язаних списків // Системи управління, навігації та зв'язку – Полтава: ПНТУ, 2021. – Т. 4(66). – С. 59-62. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.4.059>
15. Harper F.M., Konstan J.A. The MovieLens Datasets: History and Context // ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS). – 2015. – 19 p. – URL: <https://doi.org/10.1145/2827872>
16. Мелешко Є.В. Методи оцінки якості роботи рекомендаційних систем // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2018. – Вип. 5 (51). – С. 92-97. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.09>

Received (Надійшла) 11.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.03.2023

Method of working of a recommender system in a peer-to-peer computer network

V. Mikhav, Ye. Meleshko

Abstract. The article is devoted to the development of a method of work of recommendation systems in decentralized peer-to-peer computer networks. There are a large number of methods of recommendation systems for websites and applications designed for centralized computer networks. At the same time, the research of decentralized peer-to-peer networks has shown that the issue of creating recommendation systems for such architecture was practically not considered. The research of methods of work of structured decentralized peer-to-peer computer networks has been conducted, and generalized principles of their work are presented. The method of work of a recommendation system based on collaborative filtering for a structured decentralized peer-to-peer computer network with addressing based on distributed hash tables is proposed. To present the data of a recommendation system two data structures were used: the unrolled linked lists and the hash tables with open addressing. Also two types of unrolled linked lists were used: associated with users – contained lists of objects they like and associated with objects – contained lists of users who liked the appropriate objects. Each computer in a decentralized network has a preference list of associated with its user and preference lists of associated with objects located on it. The information missing on the current computer was accessed by requests to other computers using the corresponding IDs organized by a distributed hash table of a peer-to-peer decentralized network. An experimental research of proposed method of work of a recommendation system was conducted. It showed that the developed method has quite high Precision and a low RMSE. The disadvantage of the developed method is the low Recall, that is due to the fact that the method often makes false negative predictions. This does not in any way affect the accuracy of the recommendations, because objects with a negative prediction of preferences do not fall on the lists of recommendations. But this impairs the fullness of recommendations because many elements that could be added to them are rejected.

Keywords: recommendation systems, collaborative filtering, computer networks, peer-to-peer networks, decentralized networks, distributed hash tables.

M. Mozhaiev¹, V. Peresichansky², V. Roh², O. Bellorin-Herrera³

¹ Scientific Research Centre for Forensic on Intellectual Property, Kyiv, Ukraine

² Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine

³ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

METHOD OF ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS OF COMPUTER NETWORK OF INFORMATION SYSTEM OF CRITICAL APPLICATION

Abstract. Topicality. Our time is characterized by rapid growth in the number and quality of various computer systems. An increasing number of users, both in their daily and professional activities, need data transmission and Internet access services in addition to traditional communication services. The network infrastructure created as a result of convergence should provide the needs of preferably all service users. But in order to ensure the necessary quality of service, it is necessary not only to have information about the state of the telecommunications network, but also to be able to forecast it. This fact requires improving the analysis of quality indicators characterizing the state of the telecommunications network. **The purpose of this work** is to develop a method of analyzing quality indicators of a computer network of a critical application information system. **The object of the research** is the process of functioning of the computer network of the information system of critical application. **The subject of the study** is the methods of analyzing the quality indicators of the computer network of the information system. **The results.** In this work, an analysis of the main indicators of the quality of the telecommunications network, which are basic in the provision of services. **Based on the received** information, 6 states of the telecommunication network were formalized and classified, in which it is possible to provide non-essential quality of service for various types of traffic. The developed method of analyzing the quality indicators of the computer network of the information system of critical application is planned to be used in the future to ensure the quality and reliability of the functioning of computer systems of critical application.

Keywords: computer systems, computer network, critical application information system, traffic, quality indicators.

Introduction

Formulation of the problem. The modern period of development of the information society corresponds to an ever-increasing increase in demand for infocommunication services. These services are provided by a variety of computer systems, including critical ones. An increasing number of users, both in everyday and professional activities, along with traditional communication services, require data transmission and Internet access services. Today, it is generally accepted that circuit-switched and packet-switched networks are gradually evolving towards the creation of a common infrastructure. The infrastructure that emerged as a result of convergence must ensure the transport of telephone network traffic, television networks, and application traffic that traditionally uses Internet networks. Such a convergence scenario offers both economic gains from the convergence of technologies and determines the development of the telecommunications sector through the creation of new services. However, the process of convergence has so far proceeded rather slowly. And here one of the dominant ones is the problem of providing the necessary quality of service, which is one of the main inhibitory factors in the process of convergence of networks and services. In addition to the standard set of services that are currently provided by telecommunications networks, the following services can be distinguished: voice transmission; video calls; video conference; data transfer; Internet surfing; voice transmission for corporate subscribers.

In this regard, new requirements for the quality of service are put forward, involving the solution of the following tasks:

- prioritization and differentiation of traffic;
- providing information flows with the necessary network resources;

- improving transmission reliability;
- network congestion prevention;
- shaping network traffic for smoothing and creating a more uniform flow.

Different types of traffic have different network resource requirements and require different classes of service. In this regard, to ensure the required quality of service, it is necessary not only to have information about the state of the telecommunications network, but also to be able to predict it.

From the foregoing, we can conclude that the task of analyzing quality indicators that characterize the state of a telecommunications network and classifying the states of a telecommunications network is **relevant**.

Analysis of recent research and publications. The increasing rate of use of new information technologies leads to an increase in the number of services provided by the telecommunications network. According to studies [1], the dynamics of Internet traffic growth over the past ten years is 70–150% per year, i.e. On average, every year the amount of information transmitted over the network doubles.

Existing studies show that network technologies are far ahead of theoretical and analytical understanding of network interactions in their growth. Highly specialized and limited telecommunication problems of the past years are well studied and mathematically formalized, in particular, based on the provisions of the queuing theory [2]. Attempts to formalize and classify the states of a telecommunications network were carried out in [3, 4]. However, the traditional principles of theoretical analysis and existing methods do not meet the necessary requirements of the modern period of development of telecommunications. To date, information about the state of the network is represented by a set of values of quality indicators. This set of quality indicators is not standardized. For various reasons, the problem of classi-

fying the states of a telecommunications network is currently not well understood. There is currently no single approach to grading the states of a telecommunications network. All this leads to the fact that providers evaluate their capabilities differently, which in turn leads to an unjustified decrease in the quality of service.

The purpose of this work is to analyze the quality indicators used to assess the state of a telecommunications network, formalize and classify the states of a telecommunication network, as well as analyze the requirements of various types of traffic to network resources.

Main part

The state of the telecommunications network is characterized by a certain set of quality indicators. According to ITU-T Y.1540 [5] and ITU-T Y.1541 [6], it is possible to identify the main indicators of the quality of the network, which are basic in the provision of services: number of lost IP packets (IPLR); number of packets with errors (IPER); delay (IPTD); jitter (IPDV).

Number of lost IP packets (IPLR). Packet loss occurs when the value of delays in the transmission of packets exceeds the normalized value T_{max} . The main reason for packet loss is the growth of queues in network nodes that occurs during congestion. The IPLR parameter for a certain time interval t is defined as follows:

$$IPLR = \sum_t LP / \sum_t RP, \quad (1)$$

where LP – is the number of lost packets; RP – number of received packets.

Number of packets with errors. The IPER parameter for a certain period of time t is defined as follows:

$$IPER = \sum_t RPE / \sum_t RPS + RPE, \quad (2)$$

where RPE – number of packets received with errors; RPS – number of successfully received packets.

IPER depends mainly on the data transmission systems used at the physical layer of the network. The use of cables with optical fibers makes it possible to achieve high reliability of the transmitted information.

Delay (IPTD). The IPTD parameter is defined as the time ($t_2 - t_1$) between two events - the packet entering the network input point at time t_1 and the packet output from the network output point at time t_2 , where ($t_2 > t_1$) and ($t_2 > t_1$) $\leq T_{max}$, where T_{max} is the maximum delay for various applications. IPTD includes the following components:

$$IPTD = T_{нак} + T_{срeдн} + T_{сeмy} + T_{буф}, \quad (3)$$

where T_{pack} is the time to form a packet, depends on the type of traffic; T_{medium} - signal propagation in the transmission medium, does not depend on the type of traffic; $T_{networks}$ - transportation over a packet network (processing in network nodes), depends on the type of traffic; the most unpredictable and quality-reducing component of IPTD; T_{buf} - delay in the receive buffer, depends on the type of traffic, service discipline, traffic priority (SLA)

In general, the IPTD parameter is defined as the packet delivery time between source and destination for all packets, both successfully transmitted and those affected by errors. The average packet delivery delay is defined as

the arithmetic mean of packet delays in a selected set of transmitted and received packets. The value of the average delay depends on the traffic transmitted in the network and the available network resources, in particular, on the bandwidth. An increase in load and a decrease in available network resources lead to an increase in queues at network nodes and, as a result, to an increase in average packet delivery delays. Voice information and partly video information are examples of traffic sensitive to delays, while data applications are generally less sensitive to delays. When the packet delivery delay exceeds certain T_{max} values, such packets are dropped. In real-time applications (such as IP telephony), this leads to poor voice quality. The limitations associated with the average latency of IP packets play a key role in the successful implementation of Voice over IP (VoIP), video conferencing, and other real-time applications. This parameter largely determines the willingness of users to accept such applications.

Jitter (IPDV). This parameter began to be tracked quite recently, it is of the greatest importance for multimedia traffic. IPDV manifests itself in the fact that successive packets arrive at the recipient at irregular times. In IP telephony systems, this leads to sound distortion, and as a result, speech becomes unintelligible. Currently, there are several approaches for the numerical estimation of the parameter IPDV:

$$IPDV = X_k - d_{1,2}, \quad (4)$$

where X_k the absolute value of the delay in the delivery of a packet with index k ; $d_{1,2}$ is the reference value of the packet delivery delay for the same network points (input and output), defined as the absolute value of the first packet delivery delay between these network points;

$$IPDV = \text{mean}(\text{abs}(t_i - t_{i-1})); \quad (5)$$

$$IPDV = \text{mean}(\text{abs}(t_i - a_i)), \quad (6)$$

where t_i is the network delay of the i -th packet; a_i is the time of receipt of the i -th packet;

$$IPDV = \text{mean}(P_i) + \text{mean}(N_i), \quad (7)$$

$$P_i = t_i - D_i \text{ at } t_i > D_i, \quad N_i = D_i - t_i \text{ at } t_i < D_i,$$

where D_i – average delay estimate/

Based on the recommendation ITU-T Y.1540 [5], depending on the accepted values of the performance parameters of a telecommunications network, 6 classes of service can be distinguished (Table 1).

Table 1 – Compliance of classes of service with performance parameters of a telecommunications network

Param.	Class 0	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
IPTD	120mc	450mc	120mc	450mc	1c	–
IPDV	75mc	75mc	–	–	–	–
IPLR	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	–
IPER	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	–

Based on the proposed classes of service, it is possible to consider the requirements of the main types of traffic to network resources and identify the states of the telecommunications network under which it is possible to provide the required quality of service for various types of traffic. The main types of traffic encountered in telecommunication networks are: interactive audio and vid-

eo; streaming video; streaming audio; interactive data traffic; game traffic; administrative traffic; the rest of the traffic. The sensitivity of various types of traffic to the main indicators of the quality of the network, which are basic in the provision of services, is presented in Table 2.

Table 2 – Sensitivity of different types of traffic to network characteristics

Type traffic	Sensitivity level		
	<i>Losses</i>	<i>Delay</i>	<i>Jitter</i>
Voice	Medium	High	High
E-commerce	High	High	Low
Transactions	High	High	Low
Email	High	Low	Low
Telnet	High	Medium	Low
Web search	Medium ñ	Medium	Low
Constant web search	High	High	Low
File transfer	Medium	Low	Low
Video conference	Medium ñ	High	High
multicasting	High	High	High

Interactive audio and video. This type of service is mainly defined by telephone calls (VoIP), low-resolution audio and video conferences. According to studies [7], [8] and standards [9], [10], one-way delay should not exceed 150ms, jitter 30-50ms, since exceeding this threshold greatly affects the quality of speech perception. At delay values less than 100ms, service users do not notice it. Packet loss values should not exceed the threshold of 1 - 5% depending on the codec. The class of service that best meets these requirements according to [5] is 0.

Streaming video. First of all, these are such services as television broadcasting, video on demand (Video on Demand). The following general requirements are true for them [6]: good video quality; high readiness; average interactivity - determined for the reverse flow (from the user).

These requirements must be translated into values for the requirements for the transport of data over a telecommunications network. Due to the large size of a single stream (from 3.5 Mbps for MPEG-2 and from 2 Mbps for H.264) and the coding principles used, there are increased requirements for packet loss.

From recommendation J.241 [6] for excellent quality of service (ESQ), the IPLR value should be minimal. It should also be noted that the delay parameter can vary greatly depending on the video streaming service. In particular, for video on demand, “network video recorder” and services of similar architecture, these requirements increase, as more interactivity is required.

Since the latter services are more demanding on the performance parameters of telecommunication networks, it makes sense to determine the threshold value for these services as well. According to Addendum 3 dated 05.2008. to recommendation Y.1541 [11], the values of IPTD, IPDV, IPLR, IPER correspond to service class 5 of the recommendation itself. Studies [12, 13] confirm the values indicated in [14].

Streaming audio. First of all, these are such services as radio broadcasting, audio on demand (Music on Demand). For this type of traffic, the values of the performance parameters of the telecommunications

network according to [5, 15] fit into classes 0, 1. For interactive services (Music on Demand), the service class is 0, for broadcasting services, the service class is 1

Interactive data traffic. This class of traffic should include web surfing, telnet, ssh, interactive messaging (for example, chat) [14]. The class of this traffic is 2.

Game traffic. The values of the performance parameters of a telecommunications network according to studies [16 – 18] correspond to service class 0, which contradicts the recommendation [19]. The delay value for good and excellent quality of service should not exceed 100 ms, the jitter value should be less than 50 ms, and the packet loss rate should remain below 1%.

The rest of the traffic. As a rule, this is the traffic of file sharing, mail services and other less important services. Service class - 4. Depending on the type of traffic, 6 states of the telecommunications network can be distinguished. In all states of the telecommunications network, it is possible to transfer both traffic specialized for a given state and traffic with a lower priority. The state of the telecommunication network "0" is intended for real-time information exchange (in particular, for speech using IP technology). It provides for the creation of a separate queue with priority processing of packets. The "0" state is characterized by restrictions on the principles of routing (the maximum number of transits) and the allowable distance between interacting terminals (the propagation time of signals). Interactivity (probability of using interactive mode) for state "0" is defined as "high".

The state of the telecommunications network "1" is also intended for real-time information exchange, but with less stringent requirements. Therefore, less significant restrictions are imposed on the principles of routing and the propagation time of signals than for the "0" state. It also provides for the creation of a separate queue with priority processing of packets.

The state of the telecommunications network "2" is focused on data exchange with a high degree of interactivity. As well as the state "0", the level of high interactivity is assigned. In this state, in particular, signaling information is transmitted. State "2" is characterized by the same restrictions on the principles of routing and propagation time of signals as for state "0". For packets in this state, their own processing queue is formed, which is carried out with the second priority. This means that packets in the telecom network state "0" and "1" have priority for processing.

Telecommunication network state "3" is intended for exchange with a lower level of interactivity, it has the same restrictions on the principles of routing and signal propagation time as state "1". Packets in this state should be serviced with second priority. This state is considered acceptable for interactive communication.

Telecom network state "4" is intended for the exchange of various information with a low probability of loss (short transactions, streaming video, etc.). Long queues of packets are allowed for processing, which is carried out with the second priority. There are no restrictions on the routing and delivery time of messages.

Telecom network state "5" is oriented towards those IP applications that do not require high quality of service. The corresponding packets form a separate queue; service

is carried out with the lowest priority (in this case, it has the third number). There are no restrictions on the routing and delivery time of messages.

Conclusions

An analysis was made of the main indicators of the quality of the telecommunications network, which are basic in the provision of services, namely, the number of lost IP packets (IPLR), the number of packets with errors (IPER), delay (IPTD), jitter (IPDV). Depending on the

accepted values of the performance parameters of the telecommunications network, based on the recommendation of ITU-T Y.1540, 6 classes of service have been identified. The main types of traffic encountered in telecommunication networks are considered, an analysis of the requirements of various types of traffic to network resources is carried out. Based on the information received, 6 states of the telecommunication network are formalized and classified, under which it is possible to provide the required quality of service for various types of traffic.

REFERENCES

1. Kovalenko, A., Kuchuk, H., Kuchuk, N., Kostolny, J. (2021). Horizontal scaling method for a hyperconverged network. 2021 Int. Conf on Information and Digital Technologies (IDT), 331–336. doi: <https://doi.org/10.1109/idt52577.2021.9497534>
2. Mozhaev, O., Kuchuk, H., Kuchuk, N., Mozhaev, M., Lohvynenko, M. (2017). Multiservice network security metric. 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), 133–136. doi: <https://doi.org/10.1109/aiact.2017.8020083>
3. Mozhaev, M.. Calculation of Signal Information Delay in Intelligent Communication Networks/Petrovska, I., Kuchuk, H., Mozhaev, M.// 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 - Conference Proceedings, 2022.
4. Mozhaev, M.. Open Educational Resources in Forensic Sciences: International Experience / Mozhaev, M., K. Palkova, O. Agapova, A. Zile, A. Polianskyi, V. Khosha., S. Hasparian // European Journal of Sustainable Development(2022), 11, 3, 71-80, ISSN: 2239-5938 Doi:10.14207/ejsd.2022.v11n3p71.
5. ITU-T Y.1540. Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters, 2007. – 42 p.
6. ITU-T Y.1541. Network Performance objectives for IP-based services, Amendment 3, 2008. – 50 p.
7. Caky P. End to end voip quality measurement / P. Caky, M. Klimo, O. Skvarek // Acta Electrotechnica et Informatika N1 2006. – Vol. 6. – P. 17-21.
8. Szigeti T. Quality of Service Design Overview / T. Szigeti, C. Hattingh. – Cisco Press, 2004. – 145 p.
9. ITU-T G.114. One-way transmission time, 2003. – 33 p.
10. ETSI TS 101329. Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (TIPHON) Release 3, 2002. – 51 p.
11. ITU-T J.241. Quality of service ranking and measurement methods for digital video services delivered over broadband IP networks, 2005. – 47 p.
12. Greengrass J. Streaming Video Coding and SLA Requierments / J. Greengrass, J. Evans, Ali C. Begen. Cisco, 2009. 121 p.
13. Todd M. Quality of Video over IP Measuring the Quality of Streaming MPEG-2 Transport Streams over IP / M Todd. – IneoQuest Technologies, 2001. –201 p.
14. IPTV Focus Group Proceedings. Traffic management mechanisms for the support of IPTV services, 2009. – 249 p.
15. Gokhale R.S. Packet Loss Concealment in Voice Over Internet / R.S. Gokhale. – 2003. – 83 p.
16. Armitage G. Some Thoughts on Emulating Jitter for User Experience Trials / G. Armitage, L. Stewart. – 2005. – 97 p.
17. Farber J. Traffic Modelling for Fast Action Network Games / J. Farber. – MTAP, 2004. – 124 p.
18. Zander S. Empirically Measuring the QoS Sensitivity of Interactive Online Game Players / S. Zander, G Armitage. – ATNAC, 2004. – 78 p.
19. IPTV Focus Group Meeting. Classification of IPTV services based on network QoS requirements, 2006. – 37 p.

Received (Надійшла) 18.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.03.2023

Метод аналізу показників якості комп'ютерної мережі інформаційної системи критичного застосування

М. О. Можаяв, В. М. Пересічанський, В. Є. Рог, О. М. Бельорін-Еррера

Анотація. **Актуальність.** Наш час характеризується стрімким зростанням кількості та якості різноманітних комп'ютерних систем. Все більшої кількості користувачів, як у повсякденній, так і в професійній діяльності, поряд з традиційними послугами зв'язку потрібні послуги передачі даних та доступу до Інтернету. Мережева інфраструктура, що виникла в результаті конвергенції, повинна забезпечувати потреби бажано всіх споживачів послуг. Але для забезпечення необхідної якості обслуговування необхідно не тільки мати інформацію про стан телекомунікаційної мережі, але і вміти його прогнозувати.. Цей факт потребує покращення аналізу показників якості, що характеризують стану телекомунікаційної мережі. **Метою даної роботи** є розробка методу аналізу показників якості комп'ютерної мережі інформаційної системи критичного застосування. **Об'єктом дослідження** є процес функціонування комп'ютерної мережі інформаційної системи критичного застосування. **Предметом дослідження** є методи аналізу показників якості комп'ютерної мережі інформаційної системи. **Результати.** У даній роботі проведено аналіз основних показників якості роботи телекомунікаційної мережі, які є базовими при наданні послуг.. Розглянуто основні типи трафіку, що зустрічаються в телекомунікаційних мережах, проведено аналіз вимог різного виду трафіку до ресурсів мережі.. **Висновок.** На основі отриманої інформації формалізовано та класифіковано 6 станів телекомунікаційної мережі, при яких можливе забезпечення необхідної якості обслуговування для різних видів трафіку. Розроблений метод аналізу показників якості комп'ютерної мережі інформаційної системи критичного застосування планується використовувати у подальшому для забезпечення якості та надійності функціонування комп'ютерних систем критичного застосування.

Ключові слова: комп'ютерні системи, комп'ютерної мережі, інформаційна система критичного застосування, трафік, показник якості.

О. О. Можаяв¹, Ф.Ф. Сухина², В. С. Башилов²

¹ Харківський національний університет внутрішніх справ, Харків, Україна

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ВТРУЧАННЯ В КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ОБІГУ ДОКУМЕНТІВ

Анотація. **Актуальність.** Наш час характеризується стрімким зростанням кількості та якості різноманітних комп'ютерних систем. Значна кількість з них належить до комп'ютерних систем електронного обігу даними. Такий обіг потребує використання надійних систем захисту, що не завжди має місце у реальному житті. Цей факт вимагає удосконалення існуючих та розробку нових методів виявлення фактів не достовірного функціонування таких комп'ютерних систем. **Метою даної роботи** є розробка методу виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів. **Об'єктом дослідження** є процес функціонування комп'ютерних систем електронного обігу документами. **Предметом дослідження** є методи та алгоритми виявлення втручання в комп'ютерні системи. **Результати.** У даній роботі запропоновано метод виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів. Для виявлення втручання в комп'ютерні системи використано принципи алгоритму кодування за Хеммінгом. Даний метод може бути частиною системи методів виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів, яку в свою чергу можна використати для функціонування різноманітних в комп'ютерних систем критичного застосування. **Висновок.** Розроблений метод виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів планується використовувати у подальшому для забезпечення якості та надійності функціонування комп'ютерних систем електронного обігу документів.

Ключові слова: комп'ютерні системи, електронний обіг документів, алгоритм кодування, електронний цифровий підпис, криптографія, хеш-коди.

Вступ

Розвиток суспільства визначається рівнем домінування інформаційного середовища. Інформація стала невід'ємною складовою функціонування всіх суспільних установ і життя людини зокрема. Швидкий розвиток і впровадження сучасних інформаційно-комунікаційних технологій став причиною глобальної трансформації індустріального суспільства в інформаційне. Все більша частина інформації зберігається і передається в електронному вигляді. Технічний прогрес, обумовлений розвитком інформаційного суспільства передбачає використання технологій електронного обміну даними. Для управління економікою, державою, силовими структурами все більше використовуються різноманітні комп'ютерні системи. Перехід до електронного документообігу, насамперед, пов'язаний з низкою переваг його використання. Електронний документообіг дозволяє суттєво спростити роботу по формуванню, збереженню та відправці важливої інформації [1–3] та потребує створення спеціалізованих комп'ютерних систем електронного обігу документів. Це породжує значну кількість часткових проблем та задач, які пов'язані зі специфікою електронного обміну даними.

Еволюція інформаційного суспільства сприяє автоматизації людської діяльності, зокрема широкому впровадженню електронних документів (ЕД), систем електронного документообігу та електронного цифрового підпису (ЕЦП). Це очевидно на прикладі комп'ютеризації управлінської сфери. Електронний документообіг – це сукупність процесів створення, опрацювання, відправлення, передавання, одержання, зберігання, використання та знищення ЕД, які виконуються із застосуванням перевірки цілісності, і в разі необхідності, – з підтвердженням факту одержання таких документів [4–7].

Використання ЕД отримало широке розповсюдження в таких сферах людської діяльності, як освіта, медицина, державне управління та інших. Але з розвитком сучасних інформаційно-технічних можливостей виникають нові ризики та загрози, що призводять до некоректного функціонування системи електронного документообігу, зниження надійності, а також значних матеріальних втрат. Тому, використання електронного документообігу обов'язково має супроводжуватися надійною системою захисту [8].

Документообіг в державі є системою, що матеріалізує процеси збирання, перетворення, зберігання інформації, а також процеси управління: підготовку та прийняття рішень, контроль за їх виконанням [18–20]. Ефективне впровадження технологій електронного урядування неможливе без розгортання електронного документообігу із застосуванням технологій ЕЦП. Користування системою електронного обміну даними можливо лише з використанням надійних систем захисту. Проблема гарантування цілісності електронних документів є першочерговим завданням в процесі електронного документообігу. Завдання надійного захисту конфіденційних ЕД від несанкціонованого доступу, захисту інтелектуальної власності, авторських прав вирішується вже тривалий час. Проте, деякі питання розробки надійних методів забезпечення інформаційної безпеки ЕД ще потребують вирішення. У наш час великий збиток наноситься суспільству таким негативним явищем, як підробка цінних документів. Засоби виявлення підробки в традиційних документах давно і досить успішно розвиваються. Завдання виявлення фальсифікацій в електронних документах є достатньо складними і потребують великої кількості ресурсів для свого розв'язання [12–13]. Фальсифікація електронних документів може стати непоправним явищем, оскільки найменші зміни в документі можуть докорінно змінити його суть.

Електронний документообіг має важливе значення для людства і грає велику роль так, як і проблема його захисту. Однак, серед великої кількості існуючих методів захисту електронних документів жоден з них не дає повної гарантії інформаційної безпеки. Відсутність ефективних методів захисту електронних документів є джерелом постійного пошуку нових рішень, в числі яких є сучасна криптографія та стеганографія на основі використання комп'ютерних технологій. Багато праць присвячено алгоритмам побудови електронного цифрового підпису за різними схемами. Дослідження показують, що питання розробки алгоритмів побудови ЕЦП були і залишаються актуальними впродовж останніх років.

Таким чином, підсумовуючи вищесказане, можна стверджувати, що існує великий розрив між потребами в захисті електронних документів і можливостями, які можуть гарантувати існуючі методики. Тому задача створення методів виявлення та протидії фальсифікаціям електронних документів є актуальною для наукових досліджень та розробок.

Метою цієї роботи є розробка методу виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів

Основна частина

Достовірність передачі, обробки та зберігання електронних документів в наш час є вкрай важливим завданням. Ефективним способом вирішення даної проблеми є використання надлишкового хешування інформації. Введення надлишкової інформації в інформацію, яка передається мережею забезпечує можливість виявлення і виправлення помилок на стороні отримувача інформаційного повідомлення. Математична теорія побудови надлишкових (завадостійких) кодів зараз має великі досягнення. Проте, існує великий розрив між рівнем теоретичних досягнень теорії завадостійкого кодування і рівнем результатів практичного використання даної теорії [5–11].

Введення надлишковості дає можливість виявлення і виправлення помилок в інформації, яка передається і може бути змінена під час передачі. Однак, до цього відомі корегуючі, циклічні коди, коди Хеммінга, Ріда-Соломона, описані в дослідженнях [14–21], не придатні для вирішення проблеми виявлення фальсифікованих фрагментів інформації. Розрізняють коди, які виявляють помилки, і корегуючі коди, які ще додатково, крім виявлення помилки, виправляють її. Найпростішими способами виявлення помилок є контрольне сумування, а також перевірка на парність. Проте, вони не достатньо надійні, особливо при виникненні великої кількості помилок. Оскільки в документах зазвичай можуть фальсифікуватися цілі фрагменти інформації, тому, подібні механізми не можуть в повній мірі розв'язати проблему підробки ЕД.

Хеммінг розробив теорію лінійних блокових кодів. Він ввів і дав визначення основним параметрам блокових кодів, а також розробив кодуєчий і декодуєчий пристрої для своїх кодів. Для оцінки корегуючої можливості кодів Хеммінг ввів параметри кодової і мінімальної кодової відстані і показав їх залежність від довжини коду і введеної надлиш-

ковості [10]. Розглянемо детальніше використання цієї теорії для вирішення задачі забезпечення достовірності функціонування ДЕ.

Оскільки розглядається проблема підробки ЕД, при розробці методу виявлення фальсифікованих фрагментів електронного документу можна взяти за основу принципи алгоритму кодування за Хеммінгом. Код Хеммінга – самокорегуючий код, що дозволяє закодувати згідно алгоритму будь-яке інформаційне повідомлення і вразі виникнення помилки, при передачі мережею, виявити і виправити її [4]. Традиційно алгоритми кодування-декодування за Хеммінгом виявляють символічні помилки в кодових послідовностях. На відміну від традиційного алгоритму кодування за Хеммінгом, який працює з бітами, доречною є побудова алгоритму, який оперує блоками інформації, тобто фрагментами електронного документу.

Аналогічно принципам кодування за Хеммінгом, введемо надлишковість, але замість символів – додаємо блоки інформації.

Множину можливих схем хешування блоків $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ представити у вигляді двійкової матриці, де кожний рядок відповідає визначеній схемі хешування. При цьому виконуються наступні умови для рядків матриці:

- 1) відсутні нульові рядки матриці;
- 2) всі рядки матриці є лінійно-незалежними;
- 3) існує мінімальна кодова відстань між рядками матриці.

В теорії кодування для породжуючої матриці також є характерними перелічені властивості, що дає змогу використовувати правила побудови лінійних кодів для побудови систем хеш-кодів.

Система хеш-кодів – множина хеш-кодів, які отримані шляхом реалізації будь-якого алгоритму обчислення хеш-функції в порядку, визначеному спеціальною процедурою вибору записів (блоків інформації), на основі математичного апарату лінійної алгебри.

Алгоритм побудови хеш-кодів для забезпечення цілісності ЕД. Хешування вихідного блоку інформації можна представити у вигляді виразу, який є спеціальною багатовимірною не комутативною операцією хешування. Тоді, отриманий, в результаті хешування, захищений блок виглядатиме, як спеціальна багатовимірна не комутативна операція хешування інформаційних блоків електронного документу. Для пошуку всіх можливих варіантів кодів (матриць), з мінімальною кодовою відстанню між послідовностями рядків матриці, було розроблено програмне забезпечення, результати роботи якого показані в табл. 1.

Розглянемо декілька прикладів виявлення фальсифікованих фрагментів інформації на основі запропонованого методу. Як показують обчислення, між всіма кодовими послідовностями (рядками матриці) зберігається мінімальна кодова відстань, це дає можливість стверджувати, що даний код сприятиме гарантованому виправленню двохкратної помилки в блоках інформації. Схематично принцип отримання хеш-функцій показаний на рис. 1.

Таблиця 1 – Варіанти породжуючих матриць

№	Матриця	№	Матриця	№	Матриця	№	Матриця	№	Матриця
1	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0	2	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1	3	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0	4	0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1	5	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1
6	0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0	7	0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1	8	0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1	9	0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0	10	0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1
11	0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0	12	0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0	13	0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1	14	0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0	15	0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0
16	0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1	17	0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0	18	0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1	19	0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1	20	0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0
21	0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1	22	0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1	23	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0	24	0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0	25	0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1
26	0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0	27	0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1	28	0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1	29	0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0	30	0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1
31	0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1	32	0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1	33	0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0	34	0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1	35	0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1

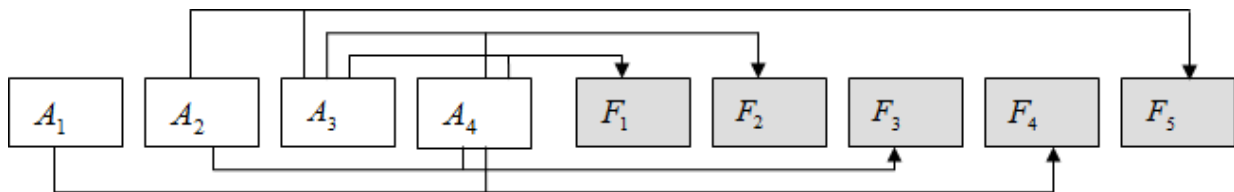


Рис. 1. Схема отримання хеш-функцій

В табл. 2 показано значення синдрому при різних комбінаціях помилок. Перевіримо правильність методу на прикладі, нехай маємо інформаційні блоки

«0101», обчислимо контрольні блоки. Всі можливі комбінації помилок в інформаційних блоках показані в табл. 2.

Таблиця 2 – Комбінації помилок в блоках електронного документу (** помилки в блоках)

0101 11011 ⊕ ** <u>1001 11100</u> 1100 00111	0101 11011 ⊕ ** <u>1111 00000</u> 1010 11011	0101 11011 ⊕ * * <u>1100 00111</u> 100111100	0101 11011 ⊕ ** <u>0011 00111</u> 0110 11100	0101 11011 ⊕ * * <u>0000 00000</u> 0101 11011
0101 11011 ⊕ ** <u>0110 11100</u> 0011 00111	0101 11011 ⊕ * <u>1101 11001</u> 1000 00010	0101 11011 ⊕ * <u>0001 11110</u> 0100 00101	0101 11011 ⊕ * <u>0111 00010</u> 0010 11001	0101 11011 ⊕ * <u>0100 00101</u> 0001 11110

Розглянемо результати виявлення і виправлення помилок приведеними кодами Хеммінга в залежності від кратності помилки. Дані результати наведені в табл. 3.

Моделі запропонованих методів обчислення хеш-функції електронного документу та методів виявлення фальсифікацій були реалізовані на програмному та апаратному рівнях.

Таблиця 3 – Виправлення помилок в блоках електронного документу (* – фальсифікований блок інформації)

	Локалізація помилки									
	Двожратна помилка					Однократна помилка				
x_1	1 *	1 *	1 *	0	0	0	1 *	0	0	0
x_2	1 *	0	0	1 *	1 *	0	0	1 *	0	0
x_3	0	1 *	0	1 *	0	1 *	0	0	1 *	0
x_4	0	0	1 *	0	1 *	1 *	0	0	0	1 *
$f_1(x_3 + x_4)$	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
$f_2(x_3 + x_4)$	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
$f_3(x_2 + x_4)$	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1
$f_4(x_1 + x_4)$	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
$f_5(x_2 + x_3)$	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0

Для розробки апаратних засобів реалізації методів контролю цілісності та виявлення фальсифікацій в електронних документах використано функціональні схеми реалізації методів обчислення хеш-функції електронного документу:

1) функціональна схема реалізації методу безключового обчислення хеш-функції на основі послідовного виконання операцій;

2) функціональна схема реалізації методу безключового обчислення хеш-функції на основі паралельного виконання операцій;

3) функціональна схема реалізації вдосконаленого методу обчислення хеш-функції електронного документу на основі послідовної реалізації обчислень;

4) функціональна схема реалізації методу обчислення хеш-функції електронного документу на основі використання операцій матричного криптографічного перетворення;

5) функціональна схема реалізації методу обчислення хеш-функції електронного документу на основі паралельної реалізації обчислень з використанням операцій матричного криптографічного перетворення;

6) функціональна схема реалізації вдосконаленого методу обчислення хеш-функції електронного документу на основі паралельної реалізації обчислень з використанням операцій матричного криптографічного перетворення;

7) функціональна схема реалізації методу ключового обчислення хеш-функції електронного документу на основі аналізу фрагменту інформації.

Функціональні схеми методів виявлення фальсифікованих фрагментів електронного документу:

1) функціональна схема реалізації методу виявлення фальсифікованого фрагменту електронного документу шляхом перехресного хешування;

2) функціональна схема реалізації методу виявлення заданої кількості фальсифікованих фрагментів електронного документу на основі надлишкового хешування контрольного блоку інформації.

Висновки

В результаті проведених авторами досліджень розроблений метод виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів для покращення достовірності електронного документу.

У цій роботі запропоновано метод виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів, який використовує обчислення хеш-функції електронного документу на основі паралельної реалізації обчислень з використанням операцій матричного криптографічного перетворення.

Даний метод може бути частиною системи методів виявлення втручання в комп'ютерні системи електронного обігу документів, яку в свою чергу можна використати для функціонування різноманітних в комп'ютерних системах критичного застосування.

У подальших дослідженнях планується розробка програмно-інструментальних засобів реалізації розробленого методу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shulze H. Theory and Applications of OFDM and CDMA / H. Shulze, C. Luders. – Germany: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. – 408 p.
2. Ungerboeck G. Channel coding with multilevel/phase signal / G. Ungerboeck // IEEE Trans., 1981. – Vol. IT-28, № 1. – P. 55 – 66.
3. Verdú S. Fifty Years of Shannon Theory / S. Verdú // IEEE Transactions on information theory. – 1998. – Vol. 44, №6. – P. 2057 – 2078.

4. Xiang W. 5G Mobile Communications / Xiang W., Zheng K., Xuemin Sh.; Springer International Publishing, 2016. – 690 p.
5. 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, 593-597, doi: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
6. O. Mozhaev Potential application of hardware protected symmetric authentication microcircuits to ensure the security of internet of things/P. Klimushin, T.Solianyuk, T. Kolisnyk, O. Mozhaev// Advanced Information Systems. 2021. Vol. 5, No. 3, P 103-111, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.14>
7. Mozhaev M. Sustainability of Open Educational Resources in Forensic Sciences: International Experience/ Karina Palkova, Olena Agapova, Aelita Zile, Anton Polianskyi, Khosha Vadym, Serafyma Hasparian, Mozhaev Mykhailo// European Journal of Sustainable Development(2022), 11, 3, 71-80 ISSN: 2239-5938 Doi:10.14207/ejds.2022.v11n3p71
8. Mozhaev, M., (2022). Devising a procedure for defining the general criteria of abnormal behavior of a computer system based on the improved criterion of uniformity of input data samples./ Semenov, S., Mozhaev, O., Kuchuk, N., Mozhaev, M., Tiulieniev, S., Gnusov, Y., Yevstrat, D., Chyrva, Y., Kuchuk, H. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 6 (4 (120)), 40–49. doi: <https://doi.org/10.15587/17294061.2022..>
9. Гнусов Ю.В., Клімушин П.С., Колісник Т.П., Можасв М.О. Аналіз систем моделювання мікроконтролерів з додатковими модулями криптографічного захисту інформації. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології №1(3) 2020 С. 79-84
10. Mykhailo Mozhaev, Viacheslav Davydov, Zhang Liqiang Analysis and comparative researches of methods or improving the software Advanced Information Systems, 2020 Vol. 4, No. 3, pp. 8-11, DOI: <https://doi.org/doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.18>
11. 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>
12. Kuchuk G., Kharchenko V., Kovalenko A., Ruchkov E. Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems. *East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2016. Pp. 1-6. doi:<https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>.
13. Kuchuk G.A. An Approach To Development Of Complex Metric For Multiservice Network Security Assessment / G.A. Kuchuk, A.A. Kovalenko, A.A. Mozhaev // Statistical Methods Of Signal and Data Processing (SMSDP – 2010): Proc. Int. Conf., October 13-14, 2010.– Kiev: NAU, RED, IEEE Ukraine section joint SP, 2010. – P. 158 – 160.
14. Mozhaev M Method of Forensic Research on Image for Finding Touch up on the Basis of Noise Entropy/O. Kluiev ; M. Mozhaiev ; M. Mozhaiev , O.Uhrovetskyi ,E. Simakova-Yefremian 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT) Publisher: IEEE, 2019 Lviv, Ukraine P. 76 – 79. DOI: [10.1109/AICT.2019.8847760](https://doi.org/10.1109/AICT.2019.8847760) (Scopus)
15. Mozhaev M., (2017). Multiservice network security metric/ Mozhaev, O., Kuchuk, H., Kuchuk, N., Mozhaev M., Lohvynenko, M.// 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017 – Proceedings, 133-136. doi: <https://doi.org/10.1109/AICT.2017.8020083>
16. . Report: Cenzic Application Vulnerability Trends Report: 2014 [Електронний ресурс] // Cenzic. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://info.cenzic.com/2013-Application-Security-Trends-Report.html>.
17. OWASP Secure Coding Practices Quick Reference Guide. // OWASP. –2010. 4 OWASP Top 10 - 2017 The Ten Most Critical Web Application Security Risks, 2017.
18. The Bobby Tables Guide to SQL Injection. Archived from the original on November 7, 2017. Retrieved October 30, 2017
19. Martin Anderson. Cross-site scripting enabled on 1000 major sites – including financial sites. The Stack. 24 лютого 2016., 205с.
20. CERT Vulnerability Notes Database. Software Engineering Institute. Original Release Date: 2008. – 21с.;
21. NIST Comments on Cryptanalytic Attacks on SHA-1 - NIST Information Technology Laboratory / 2006.

Received (Надійшла) 18.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.03.2023

A method of detection of interference in computer systems of electronic document circulation

O. Mozhaiev, F. Sukhina, V. Bashylov

Abstract. Topicality. Our time is characterized by rapid growth in the number and quality of various computer systems. A significant number of them belong to computer systems of electronic data circulation. Such circulation requires the use of reliable protection systems, which the city does not always have in real life. This fact requires the improvement of existing and the development of new methods of detecting facts of unreliable functioning of such computer systems. **The goal of this work** is to develop a method of detecting interference in computer systems of electronic circulation of documents. **The object of research** is the process of functioning of computer systems of electronic circulation of documents. **The subject of research** are methods and algorithms for detecting interference in computer systems. **Results.** This paper proposes a method of detecting interference in computer systems of electronic document circulation. The principles of the Hamming coding algorithm were used to detect interference in computer systems. This method can be a part of a system of methods for detecting interference in computer systems of electronic document circulation, which in turn can be used for the functioning of various critical application computer systems. **Conclusion.** The developed method of detecting interference in computer systems of electronic document circulation is planned to be used in the future to ensure the quality and reliability of the functioning of computer systems of electronic document circulation.

Keywords: computer systems, electronic circulation of documents, coding algorithm, electronic digital signature, cryptography, hash codes.

M. Omarov, V. Korobskiy, V. Nevliudova

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF KINEMATICS AND CONTROL OF MULTI-LINK MANIPULATOR ROBOTS

Abstract. The subject of research is multi-link manipulators, their kinematics and methods of controlling multi-link manipulator robots. To improve the accuracy of movement of each link and their synergy of work with each other during operation. In addition, the subject of the research is the analysis of the requirements for multi-link robot manipulators and the improvement of the kinematics of the robot-manipulator movements based on the comparison of mathematical methods in operating conditions. In different operating conditions manipulators and the automation of the production line is a big step for industry. Instead of a traditional industrial robot, a multi-link manipulator robot can be a good intermediate solution. It is more maneuverable, flexible, and has more complex movements for working on serial production. Multi-link robots provide a quick replacement of skilled labor in case of a shortage of employees or when production needs to be accelerated. As with any revolutionary technology, it is necessary to be critical of its implementation. The most decisive advantage of a robot over a single-link industrial robot is flexibility. Especially since the production environment needs to be able to adapt to handle the work with small volumes and a large number of different tasks. Such robots are more mobile and take up less space than traditional industrial robots. They are easier to reprogram to perform different jobs or product variants. However, it is worth noting that programming a traditional robot, which in its specialized environment requires deep knowledge and endless settings. When using a robot, the entry barrier for operators is significantly reduced, while deployment and ROI are accelerated. **The aim of** the work is to determine how the project context affects the choice of motion techniques and to determine the dependencies between requirements discovery methods. The article solves the following tasks: to study the trajectory of robots and compare mathematical control methods. Requirements in industry, create and draw a parallel regarding the practice of using demonstration robots and requirements in real conditions of using multi-link structures, determine the preferences of practitioners regarding detection methods and determine how the project context affects the choice of requirements detection techniques, determine dependencies between requirements detection methods. **The task** using such a method as a parametric form of the task is to prove that: the mathematical model of motion trajectories is the most reliable. Development and improvement of kinematic movements of manipulators with synergy of movements between manipulators. The following results were obtained: The best detection **methods** were identified and compared with other comprehensive studies. **Conclusion:** It was concluded that the choice of the shape of the wave-like trajectory of the movement; a traveling wave in a coordinate system moving along this sine wave form should be used as a control program for an automatic drive system. The assignment of a form in the form of a sine wave appears unsuitable for this task, because the obvious disadvantage of the sine wave is a continuous change in curvature and greater curvature at the peaks at large amplitudes.

Keywords: manipulators, mechanisms, movement trajectory, snake robots, trunk bending, movement phases, angular deviation.

Introduction

Reports of automatic technical devices with more or less complex mechatronics for production, festive events, or demonstration models that have appeared in recent decades and at the very beginning of the nineties are designed to perform the same type of monotonous work and to simplify and optimize the production process. It is worth noting that it is recognized that demonstration robots are an independent class of robots with their own distinctive types and features. Demonstration robots include movable manipulators with component parts or moving robotic machines with automatically controlled drives that do not perform any production functions but demonstrate themselves or other objects [1,2,3]. Demonstration robots are widely used to attract attention at exhibitions, in advertising, in entertainment, on theater stages [2], during holidays and in processions in parks and attractions. Competitions are organized for some types of demonstration robots (e.g., for culinary robots that compete with each other in cooking battles). Manually operated mini robot spies have become very popular. Demonstration robots primarily involve an element of initiative and invention, but many demonstration robots, drives, and their

mechanisms and control systems deserve serious scientific consideration.

Various aspects of industrial robots are usually considered within the framework of typical industrial production projects: based on the existing requirements, the optimal option is selected, which specifies the type of robots required for a given task, their number, and also addresses the issues of power supply infrastructure (power supply, coolant supply - in the case of liquid cooling of equipment elements) and integration into the production process (provision of blanks/semi-finished products and return of the finished product to the automatic

Small demonstration robots can be considered reptilian robots (spies) with rather complex control systems. Also, demonstration robots for games (plau game). Currently, most reports on the Internet refer to such robots. According to the geometry of their mechanisms, kinematics and appearance, they can be anthropomorphic, android or simply androids (imitating humans) or zoomorphic (imitating animals, such as dogs). There are also unique discoveries. One of the most sophisticated and advanced demonstration robots is the bipedal anthropomorphic robot Azino from Honda, which is capable of not only walking on the

floor but also climbing stairs, communicating with people, and gesturing meaningfully.

The most large-scale demonstration robots in demand are those based on long, bendable shells or multi-link chains. Flexible long body parts with similar properties include the trunks and long necks of some animals (giraffe, Chinese dragon), and possibly larger wings (albatross). As for the theatrical stage, a transformed figure of a ten-meter giant, whose design included a multi-link mechanism of a bending spinal column, and a dragon structure, was developed and realized [3]. Technogenic fantasies based on self-modified geometric shapes depicting stylized technical objects and even moving compositions. The development of this area allowed us to outline some ways to further develop this idea with prospects for technical implementation

Analysis of recent research and publications

The analysis of current robots has shown that today the problem of controlling robots with complex control kinematics is being acutely analyzed. When analyzing risks, the causes of their occurrence are considered. Methods of risk analysis have been developed: risk assessment depending on the characteristics of the robot control method, the degree of innovation novelty, analysis of innovation risk at certain phases of the robot life cycle, with a scale for assessing the effectiveness of mathematical modeling of each of the mathematical models and a proposed analysis and their effectiveness [9, 3].

There are works on theoretical and practical issues of risk management, in which one of the important stages is the task of choosing a way to reduce risks and increase efficiency. The author identifies the sequence of risk management processes according to this sine wave shape and describes ways to minimize risks. The main attention is paid to the principles of phasing and a large deviation tolerance based on concrete examples. The issues of minimizing the risky outcome are considered with a detailed consideration of the risk-forming factors, taking into account the degree of uncertainty of the environment [5, 7].

In foreign publications, considerable attention is paid to the development of standards for managing kinematics, required deviation tolerances, and management risks on different surfaces. Innovation risks are often defined as the probability of loss arising from different weather conditions. In foreign publications, considerable attention is paid to the development of standards for kinematic control, required deviation tolerances, and risks of control on various surfaces. However, little attention has been paid to the issue of risk selection methods and risk pairing mechanisms. The decision to choose a method does not take into account all the factors of influence in real operating conditions. One of the effective ways is to increase the risk factors for the robot during the operation period and calculate these risks by mathematical modeling. This method is mainly used for the final commissioning of any mechanical device [11,12]. Let us first consider the general problem of

creating a mechanical system of the torso, taking into account its large size. The article considers snake robots of variable geometry, serpentine or serpentine demonstration robots, which are characterized by the presence of a long main bending body. The head may have independent degrees of freedom, but it may represent the last link of the body; Chinese dragons also have legs. It is known that the serpentine dragon is an indispensable participant in festivities in a number of countries in Southeast Asia. Interest has been expressed in creating a controlled (on cables) flying dragon for China, about 100-200 meters long. There is no doubt that moving snakes and dragons of smaller, but rather large sizes will find their place in the productions (primarily with fairy tales and theatrical plots) of many large theaters in Ukraine. The authors' proposed classification of variants of designs similar to demonstration robots with variable geometry, as well as their components, by several features is shown in fig. 1.

The structures of demonstration robots of variable geometry and their components can be built as multi-link mechanisms, deformable elastic bearing elements along the entire length, or as a sequential structure with rigid links. It is even possible to combine these principles.

In most cases, larger demonstration works are built on non-existent structures, as on internal skeleton frames, with a light decorative outer shell, cladding. If the shell that forms the appearance is rigid, then its attachment to the core or company frame is usually carried out at many points; during bends, it is necessary to ensure mobility, against slipping without jamming or touching adjacent fragments. However, it is possible that flexible (in particular, corrugated) cladding can be used not only as an appearance forming, but also as a load-bearing material. So far, load-bearing plastic cladding without frame structures has been used exclusively in small-scale works.

A large number of publications have been devoted to deciphering and explaining the mechanisms of snake movement, developing their mathematical models, and creating moving models that copy the principles laid down by wildlife (e.g., [4, 5]). It is recognized that the very principle of movement only by bending the body without limbs is based on the use of differences between the friction coefficients in transverse and longitudinal movements.

In relation to the general ideology of demonstration robotics, this article is about different, perhaps completely different, but adapted for technical implementation ways of building mechanisms and reproducing geometric shapes typical of snakes in motion. This means dividing the tasks of movement into the tasks of movement itself to follow a certain trajectory. It is assumed that the movement can be set by wheels with drives that may be uncontrollable either in terms of rotation angles or in terms of speed.

Regardless of the design, the desired laws of variable geometry and kinematics of serpentine robots are determined by the following basic requirements: the points of the midline of the sections must move along the same fixed wave-like trajectory when coiling [6];

- Restrictions are imposed on the curvature of the cross-sectional midline from above, due to structural constraints; however, curvature continuity is not required [6-8];

- Programmability and adaptability of the software, reproduction of motion by means of a drive system should be ensured [10-13].

- Movement in the coordinate system moving with the snake is represented by a sinusoid running from head to tail [7];

- It should be possible to change the lateral deviations from a straight line within a wide range to ensure balance [5-6];

To begin with, we will not take into account the natural constructive discretization of the snake's body

along the lengths. The most important starting point is the choice of the shape of the wave trajectory; a traveling wave in the coordinate system moving along this sinusoidal shape should be used as a control program for an automatic drive system.

Setting the shape in the form of a sinusoid seems to be unsuitable for this task, because the obvious disadvantage of a sinusoid is a continuous change in curvature and greater curvature at the vertices at large amplitudes [7].

Purpose of the article – Analyzing and improving the kinematic motion of manipulators with synergistic movements with each other. As well as the development of a more, perfect bending torso, and the robot's head and its degrees of freedom in movement.

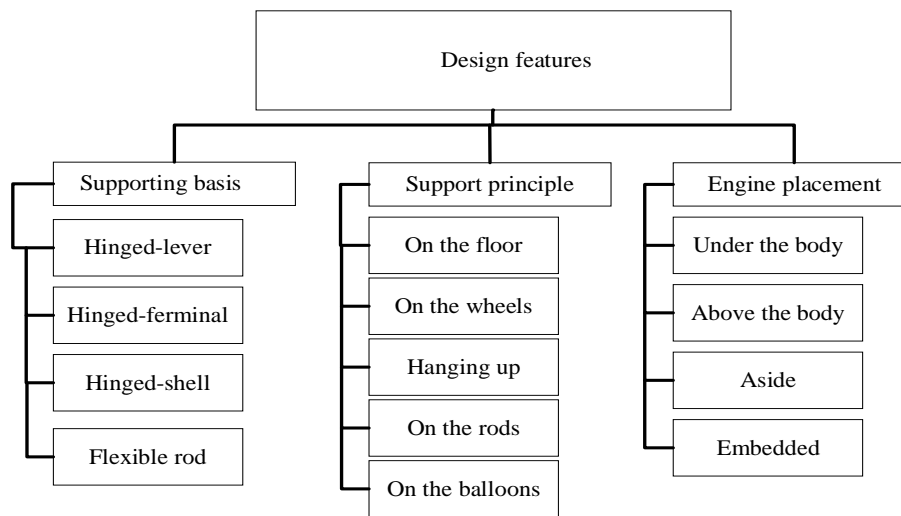


Fig. 1. Qualification of the design of demonstration robots with variable geometry and their components

Solving the problem

With the above requirements, only the parametric form of the trajectory in the form of $x(s)$ and $y(s)$ can be used. As an argument s , it is advisable to take the length of the arc s of the trajectory section from the selected starting point. Then, for the movement of a snake with a speed V , the determination of the coordinates of the points of its midline of sections along the length is carried out directly by replacing the argument s with $(l + Vt - l_0)$.

In the program movement, the velocity vector of each point of the snake along the length is directed along the trajectory. This greatly facilitates the possibility of various schematic, fundamental and constructive solutions, and even the implementation of such movements on controlled drives. For example, rolling bearings with axes perpendicular to the centerline of the cross-sections can be placed along the length of the body. For a stage demonstration robot, it is possible to lay a track along the entire length of the railroad track, and then movement along it will occur without slippage [8].

Fig. 2 shows only one period of such a wave - the i -th section of length Δl starts from the centerline. It is proposed to form a formula for a trajectory in a fixed coordinate system (or a traveling wave in a moving

coordinate system) by combining the arcs of circles of radius R with displaced centers [10].

Both the shape and the length of the arc on the period are determined by two parameters: the radius R and the angle a . The analytical representation of this shape by halves of the period: when $0 < s < R(\pi + 2a)$, i.e., for the first half of the period,

$$x = \Delta s_2 = R[\cos a - \cos (\Delta s_1 / R - a)];$$

$$x = \Delta s_2 = -R[\sin a + \sin (\Delta s_1 / R - a)]. \quad (1)$$

at $R(\pi + 2a) < s < 2R(\pi + 2a)$, i.e., for the first half of the period,

$$x = \Delta s_2 = R[\cos a - \cos (\Delta s_2 / R - a)];$$

$$x = \Delta s_2 = -R[\sin a + \sin (\Delta s_2 / R - a)]. \quad (2)$$

In these expressions, the increase in the length of the arc s_1 is counted from the beginning of the period (from the point A_i), and the increase in the length of the arc s_2 is counted from the middle of the period (from the point B_i) [9].

This results in the following relationships between the length S_0 of the arc on the period, radius R , angle a , arc length L , along the centerline of the cross-sections, transverse span B (i.e., overall size), and the elimination of h centers of circular sections:

$$S_0 = 2R(\pi + 2a); L = 4 R \cos a;$$

$$h = R \sin a; B = 2 R(1 + \sin a). \quad (3)$$

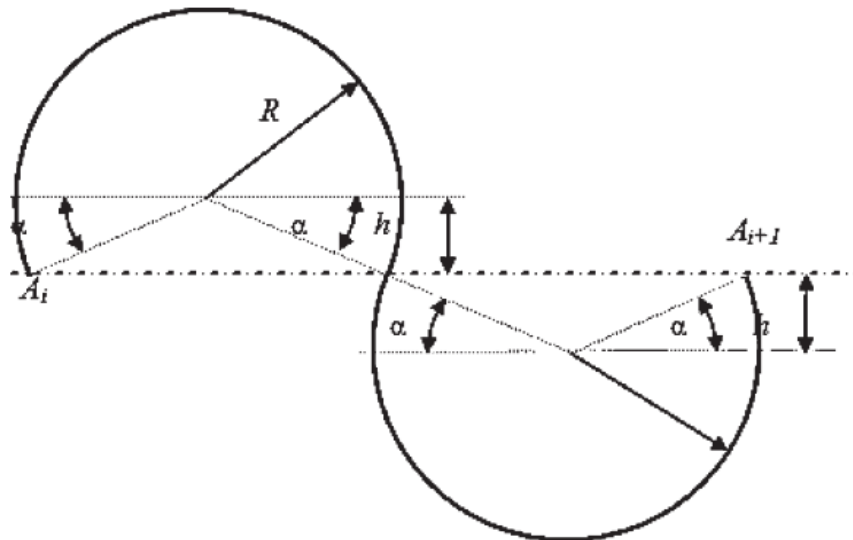


Fig. 2. Forming a trajectory by combining circles

The characteristic shapes of the three variants of the curves with the adopted analytical method of representation for the same value of the radius R are shown in fig. 3, a, b, c. The simplicity of these relations determines the good adaptability of the proposed form for programming movements. Here, the values of the parameter a are respectively $a = 0, a = -30^\circ, a = +30^\circ$. At the same value of the radius R , a shorter wave resembles a sinusoid, while negative values of the angle a correspond to a smoother wave [15,14].

As it will be shown below, this allows to create a wave that runs by relay control of drives along sections. With regard to shape control tasks, it is important that in this representation the curvature and radius of curvature are piecewise constant and change sign twice per wave period.

Three consecutive phases of such a movement, in which all points of the snake move along the same periodic trajectory (dashed), are shown in fig. 4.

Without discussing the issue of removing the overturning, we assume that the modules are single-wheeled. Let us first consider a method of constructing snake-like robots on chain mechanisms, the rigid links (modules) of which, bogies on wheeled chassis, are connected in a pivotal series. The module body is a rigid drum. Vertical-axis hinges, in which successive modules are connected to each other, are extended at equal distances forward and backward along the longitudinal axis. Fig. 5 shows such a single-wheeled module [10].

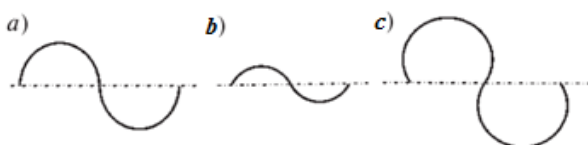


Fig. 3. Variants of movement trajectories based on obtaining arcs of circles of the same radius

The design of the module with three independently rotating wheels forming a platform support triangle

generally provides stability on the horizontal plane. However, for a three-wheeled chassis, the ability to move with rolling wheels without slipping laterally depends on the mobility of the wheel axles relative to the platform. Naturally, an independent one-wheeled or two-wheeled module is not able to maintain a vertical position, only the connection of modules by movable joints can give a stable configuration of the snake as a whole with sufficient rigidity of the hinge joints. It is assumed that the chain of such drums has a single flexible (e.g., corrugated) covering (fabric or plastic). This covering should have an appropriate texture that forms the overall appearance of the snake's body. A two-wheeled module with sufficient wheel spacing on the sides will not allow you to roll over just on one side. Let's first assume that the triangular platform is rigidly connected to the drum of the module. Then, if two wheels rotate freely around the same axis, and the third wheel is an autonomous self-mounted wheel with an independent vertical axis, the properties with respect to trajectory movement are the same as for a three-wheeled and two-wheeled wheel [12].

In particular, all or only some modules can have wheel drives. In the following, when considering the tasks of moving along a given trajectory, the modules are depicted as single-wheeled, but the conclusions are valid for other, more complex options.

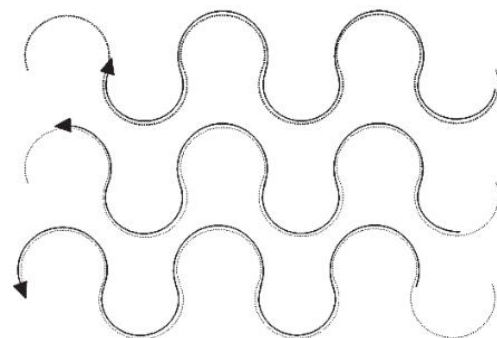


Fig. 4. Phases of movement along a periodic trajectory

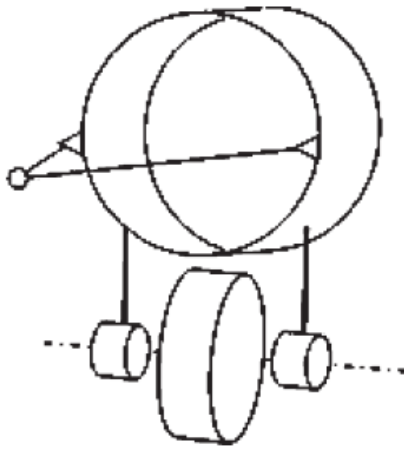


Fig. 5. Single-wheeled module of a snake-like robot with a hinged connection with vertical axes

If all three wheels are self-setting, the properties are completely different: rolling movement in any direction is possible without lateral wheel slippage. Modules with different numbers of wheels and non-driven, controlled by turning angles or uncontrolled) have the right to exist and be used in practice.

In undisturbed motion, the chain of modules reproduces a running wave, the planes of the wheels are almost everywhere close to the tangents to the programmed wave-like trajectory, which means that the

wheels can rotate almost without lateral slippage, while the centers of the hinges are significantly offset from the specified trajectory to the side opposite to the center of curvature. A chain of hinged modules following a wave-like trajectory is shown in fig. 6. It is assumed that the centers of the contact spots of the wheels with the reference plane are on the program curve. Holonomous (geometric) connections reflect the constancy of the distances between the hinges of each module, and non-holonomous connections reflect the absence of lateral slippage in each of the unicycle modules [11].

Of course, the distances of both hinges from the vertical axis of the wheel are the same, i.e., $\eta = 1$. It turns out that it is very important to choose a dimensionless parameter - the ratio $\eta = l_1/l_2$ of the distances l_1 and l_2 from the hinges (counting from the head) before and after the point where the wheel touches the plane. Fig. 7, a shows that in this case, at a precisely specified angular position, pairs of adjacent or any number of modules connected in series can move along a circular path of any radius without slipping, since the wheel planes will be tangent to the same circular path. It turns out that when moving, it is enough to set the correct initial position of all modules along a circular trajectory of a given (any) radius, use any module as a master, and there is no need to control the rotation of the modules' wheels; the movement will be in a circle without any guides.

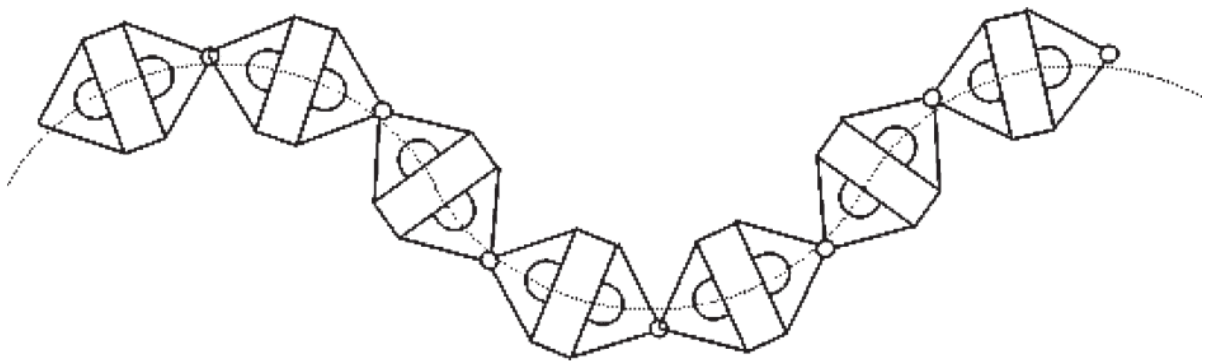


Fig. 6. Movement of hinged modules along a wave-like trajectory

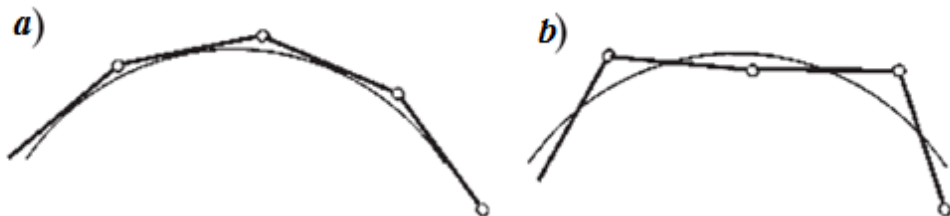


Fig. 7. The effect of setting the angular position of a pair of adjacent hinged modules on the movement along a circular trajectory

This seems to imply that if the program trajectories are formed from sections of circles, as in fig. 2, then in most of each of these sections, the constant curvature will fully correspond to the kinematics of the module connection, but it should be borne in mind that at $\eta = 1$, the angular deviation of one module (it can be

considered the leading one) leads to a wave that does not fade away (fig. 7, b) and to further distortion of the trajectory shape. It can be shown that when $\eta < 1$, the deviations along the chain of modules will decrease (which can be qualified as kinematic stability), and when $\eta > 1$, they will increase.

In this case, we have the previously considered case of $\eta = 1$ can be considered as corresponding to the limit of kinematic stability [13, 14].

Results

If in the proposed programmable motion the curvature of the sections takes only one of two values (positive and negative), then each linear actuator can be two-position and operate from stop to stop, which simplifies implementation. When moving along a piecewise circular trajectory, it should be borne in mind that there are local changes in geometry in areas close to the straight centerline, where the curvature must change sign, and this effect, taking into account lateral slippage, must be separately investigated by mathematical modeling. Consider the method of setting the relative angular position of two adjacent modules using a linear motor (Fig. 8).

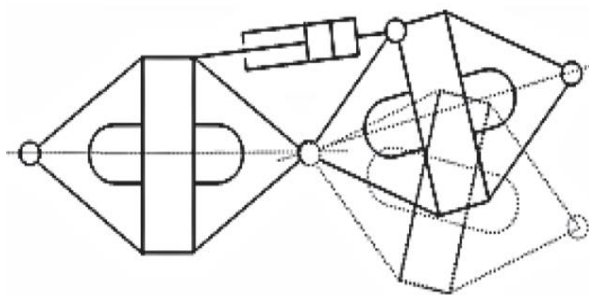


Fig. 8. Setting the angular position of adjacent modules using a linear motor

In particular, if the drive is pneumatic, then the motors can be pneumatic muscles, if the drive is electromechanical, then the motors can be of the solenoid type. When using the relay law of curvature control, it is for these zones that deviations from the program laws should be investigated, resistance forces should be estimated, etc. When moving, the control system should switch to the opposite position when a pair of modules passes the centerline. Thus, when the snake moves along the trajectory, the commands to switch the drives will follow several chains in parallel. The modules do not necessarily have the same dimensions, for example: at the tail, they may have smaller cross-sections and different distances between the connecting joints. For such a chain, the motion is realized in such a way that the tangents to the trajectory lie in the plane of the wheels or are close enough to them. In such cases, it is necessary to consider the choice of programmable trajectories separately. Mechanical manipulators are spatial mechanisms in the form of open, rarely closed kinematic chains of links forming kinematic pairs of one, rarely two degrees of mobility with angular or translational relative motion and a system of drives usually separate from each degree of mobility. At the end of the manipulator is the working body. The design of manipulators is determined primarily by their kinematic scheme. In addition, the type and location of the drives and mechanisms for transmitting motion from them to the

manipulator's links are essential. Finally, manipulators often use balancing devices, which also have a significant impact on the design of manipulators.

Conclusions

Thus, based on the analysis of the material, it is possible to calculate the kinematics of each link of the manipulator quite accurately. In addition, a three-link manipulator based on the above formulas (1), (2), (3) or another multi-link manipulator. During the analysis of the robot, the problem of kinematics was solved, and it is possible to incorporate such a mathematical approach into the neural network approach. Based on the robot's training and automatic correction of the coordinate system, it is possible to move the robot in complex areas of movement. For a multi-link manipulator, the task becomes more complicated as the number of links increases due to the possibility of complex motion trajectories. To this end, the neural network will need to be further improved depending on the operating conditions. The input data for training the neural network can be solved using the parametric form of the motion trajectory because this method is accurate in calculations. Multi-link robot is a relatively new technology, but it is quite competitive compared to conventional robots. A multi-link robot is particularly well suited for large companies with a larger budget and a greater level of expertise.

Some disadvantages of multi-link robots are worth noting:

- they are not heavyweights, those models of robots that are very expensive to operate, and therefore are usually intended for light manufacturing and logistics tasks (15).

- traditional robots are more predictable and better suited for high-volume production. In addition, humans are still better at some complex tasks that require advanced pattern recognition using sensors or spatial awareness.

Effective operation of a multi-link robot depends on readiness:

- learn what is required to program, operate, and maintain it.

- avoid monotonous, repetitive work that causes injuries and move towards more interesting tasks.

- Specialists are needed for programmatic, mechanical, kinematic, and other adjustments (16, 17).

- When humans and robots occupy the same space, inherent safety issues arise. The danger can be minimized with the help of cameras, laser scanners, sensors, LED and audio feedback, and pattern recognition using machine learning. As before, each case requires a critical risk assessment, taking into account various factors.

However, despite all the difficulties in use, such robots are used for casting, stamping, welding, carrying loads, installing parts, assembling bodies, and other work to automate and speed up production processes. This can significantly reduce the time spent on production work and reduce the price of the service or product of the original product.

REFERENCES

1. Lynch KM, Park FC. Modern Robotics – Mechanics, Planning, and Control. Cambridge University Press; 2017.
2. Li XJ, Cao Y, Yang DY. A numerical analytical method for the computation of robot workspace. In: The Proceedings of the Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications". Beijing; 2006.pp. 1082-1086. DOI: [10.1109/CESA.2006.4281805](https://doi.org/10.1109/CESA.2006.4281805)
3. Dash AK, Chen IM, Yeo SH, Yang G. Workspace generation and planning singularity-free path for parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory. 2005;40(7):776-805. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2005.01.001](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2005.01.001)
4. Knox, Lisa (2007). Robot: the life story of technology. Westport, TX: Greenwood Publishing Group
5. Trebuña F, Virgala I, Pástor M, Lipták T, Miková L. An inspection of pipe by snake robot. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2016;13(5). DOI: [10.1177/1729881416663668](https://doi.org/10.1177/1729881416663668)
6. Шлагер, Дж. (Липень 1956 р.). "Системна інженерія: ключ до сучасного розвитку". Транзакції IRE. EM-3 (3): 64–66. DOI: [10.1109/IRET-EM.1956.5007383](https://doi.org/10.1109/IRET-EM.1956.5007383).
7. Siciliano B, Sciavicco B, Villani L, Oriolo G. Robotics: Modeling, Planning and Control. Springer; 2009. DOI: [10.1007/978-1-84628-642-1](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1)
8. Chumakova T. M. Analysis of the current state of the machine-building complex of Ukraine [Electronic resource] / T. M. Chumakova: <http://www.nbu.gov.ua>.
9. Electronic version of the journal "Science and Life" <https://esu.com.ua/article-70595>
10. Dziuba M.I. Analysis of the state of machine-building enterprises of Ukraine in foreign and domestic markets [Electronic resource] / M.I. Dziuba: <http://www.mev-hnu.at.ua>
11. Roozing, Wesley; Li, Zhibin; Tsagarakis, Nikos; Caldwell, Darwin (2016). "Design optimization and control of appropriate actuation mechanisms in hinged robots for energy efficiency". Robotics and Automation Letters. DOI: [10.1109/LRA.2016.2521926](https://doi.org/10.1109/LRA.2016.2521926).
12. Aristidou A, Lasenby J. FABRIK: A Fast, Iterative Solver for the Inverse Kinematics Problem. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 2010. Submitted to Graphical Models
13. Kelemen M, Virgala I, Lipták T, Miková L, Filakovský F, Bulej V. Anovel approach for a inverse kinematics solution of a redundant manipulator. Applied Sciences.
14. Virgala I, Lipták T, Miková L. Snake robot locomotion patterns for straight and curved pipe. Journal of Mechanical Engineering. 2018;68(2).
15. Fahini F. Autonomous Robots – Modeling, Path Planning, and Control. Springer; 2009. DOI: [10.1007/978-0-387-09538-7](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09538-7)

Received (Надійшла) 18.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.02.2023

Особливості кінематики та управління багатоланкових роботів маніпуляторів

М. А. Омаров, В. В. Коробский, В. В. Невлюдова

Анотація. Предметом дослідження багатоланкові маніпулятори їх кінематики та методи управління багатоланкових роботів маніпуляторів. Для покращення точності руху кожної ланки та їх синергія роботи один з одним під час роботи. Також предметом дослідження являється аналіз виявлення вимог до багатоланкових роботів маніпуляторів та покращення кінематики рухів робота-маніпулятора на основі порівняння математичних методів у умовах експлуатації. В різних умовах експлуатації маніпуляторів, автоматизація виробничої лінії – великий крок для промисловості. Замість традиційного промислового робота багатоланковий робот-маніпулятор може стати гарним проміжним рішенням. Він більш маневрений, гнучкий і відрізняється виконанням більш складних рухів для роботи на серійному виробництві. Багатоланковий робот забезпечують швидку заміну кваліфікованої робочої сили в разі нестачі співробітників або коли потрібно прискорити виробництво. Як і у випадку з будь-якою революційною технологією, необхідно критично ставитись до її реалізації. Найбільш вирішальною перевагою робота перед одноланковим промисловим роботом є гнучкість. Особливо з огляду на те, що виробниче середовище має вміти пристосовуватися, щоб справлятися з роботою з дрібними обсягами та великою кількістю різних завдань. Такі роботи є більш мобільні та займають менше місця, ніж традиційні промислові роботи. Їх простіше перепрограмувати до виконання різних робіт чи варіантів продукту. Але варто зазначити що від програмування традиційного робота, який у своєму спеціалізованому середовищі вимагає глибоких знань і нескінченних налаштувань. При використанні робота вхідний бар'єр для операторів значно знижується, при цьому прискорюється розгортання та рентабельність інвестицій. **Мета** роботи полягає в тому, щоб визначити, як контекст проекту впливає на вибір техніки руху, та визначити залежності між методами виявлення вимог. У статті вирішуються наступні завдання: вивчити траєкторію руху роботів та порівняння математичних методів управління. Вимог у діяльності на промисловості, створити та провести паралель щодо практики використання демонстраційних роботів та вимог в реальних умовах використання багатоланкових конструкцій, визначити переваги практиків щодо методів виявлення та визначити як контекст проекту впливає на вибір техніки виявлення вимог, визначити залежності між методами виявлення вимог. **Завдання:** використовуючи такий метод як параметрична форма завдання довести що: математична модель траєкторій руху є найнадійніша. Розробка та покращення кінематичної рухів маніпуляторів є синергією рухів між маніпуляторами. Були отримані такі результати: Найкращі **методи** виявлення були визначені та порівняні з іншими всебічними дослідженнями. **Висновок:** Зроблено висновок, що вибір форми хвилеподібної траєкторії руху; біжуча хвиля в системі координат, що рухається за цією формою синусоїди має бути використана як програма керування автоматичною системою приводів. Завдання форми у вигляді синусоїди стосовно даної задачі представляється непридатним, тому що явний недолік синусоїди - безперервна зміна кривизни і більша кривизна у вершинах при великих амплітудах.

Ключові слова: маніпулятори, механізми, траєкторій руху, роботи-змії, згинання тулуба, фази руху, кутове відхилення.

А. О. Подорожняк¹, Н. Ю. Любченко¹, Д. Є. Петрукович², Д. П. Оніщенко¹

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ НОМЕРІВ НА RASPBERRY PI

Анотація. Об'єктом дослідження даної роботи є засоби машинного навчання для автоматичного розпізнавання автомобільних номерів. **Мета** даної роботи полягає у дослідженні реалізації системи для розпізнавання автомобільних номерів засобами Raspberry Pi 4. Основним завданням даного дослідження є аналіз аналогів існуючих систем автоматичного розпізнавання автомобільних номерів у середовищі апаратних продуктів Raspberry Pi, а також реалізація власної системи та її дослідження. У результаті дослідження існуючих аналогів було виявлено певні проблеми та знайдено шляхи їх вирішення. Система використовує сучасні технології штучних згорткових нейронних мереж для вирішення поставленої задачі. Також слід зазначити, що розроблена система працює краще конкурентних на великих кутах зйомки. У результаті виконання роботи було реалізовано систему автоматичного розпізнавання автомобільних номерів засобами плати Raspberry Pi для інтелектуальних вбудованих систем. Було проведено дослідження та виявлено великий потенціал запропонованої розробки у середовищах, де швидкість роботи системи не буде критичною.

Ключові слова: система розпізнавання автомобільних номерів, алгоритми машинного та глибокого навчання, згорткова нейронна мережа, інтелектуальна вбудована система, Raspberry Pi.

Вступ

Використання систем автоматичного розпізнавання автомобільних номерів відбувається у навколишньому сучасному світі кожного дня [1, 2]. Такі системи можуть використовуватись при фіксації дорожньо-транспортних пригод, автоматичних системах надсилання штрафів, для розумних систем паркування, тощо. Кожен з названих прикладів неможливо реалізувати без інтегрування системи автоматичного розпізнавання автомобільних номерів [3].

На сьогодні на дорогах України використовуються 237 камер фотовідеофіксації (рис. 1) [4].

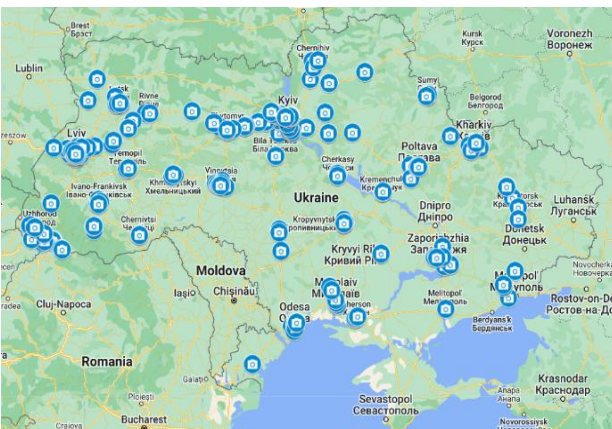


Рис. 1. Карта камер фотовідеофіксації на дорогах України

Особливістю таких камер є можливість розпізнавання не тільки факту перевищення швидкості, а й номерного знаку автомобіля, що дозволяє виписувати штрафи у автоматичному режимі.

Мета статті: ідея дослідження полягає в такому: провести аналіз існуючих систем автоматичного розпізнавання автомобільних номерів у середовищі апаратних продуктів Raspberry Pi, вибір схемотехнічної та алгоритмічної бази, реалізація власної системи на Raspberry Pi та її дослідження і формулювання перспектив застосування та подальшого розвитку.

Апаратна реалізація системи автоматичного розпізнавання номерів

Один з найбільш широко використовуваних методів реалізації такої системи – передача відео потоку на сервер та подальша його обробка. Такий підхід називається програмним. Він має свої плюси, проте головним мінусом будуть високі вимоги до швидкодії та обчислювальних характеристик апаратної частини системи. Оскільки відео є неперервним потоком інформації, тому сервер повинен бути достатньо потужним для обробки усіх потоків одночасно [5].

Інший підхід – апаратний. Ідея апаратної реалізації системи автоматичної фіксації автомобільних номерів полягає у тому, що фіксація номера відбувається «на місці», тобто безпосередньо камерою. Плюсами такого метода є можливість пересилати лише корисну інформацію, наприклад, тільки факт перевищення швидкості у форматі дата-час-номер автомобіля-швидкість. Проте такий підхід також має вагомий мінус – такі апаратні засоби повинні бути достатньо потужними для обробки зображень у реальному часі, що робить їх доволі дорогими [6].

Серед існуючих систем для вирішення такої задачі існує багато різних камер. Це спеціальні камери, котрі встановлюються на приватних об'єктах і, можливо, містять не тільки модуль розпізнавання автомобільно номеру, а й обличчя. Такі камери добре підходять для великих підприємств коли має сенс закупити їх оптом десятками, сотнями або навіть тисячами штук, для встановлення на об'єктах, що охороняються.

Для побудови інтелектуальної вбудованої системи необхідно обрати систему на кристалі (SoC), достатньо потужну для реалізації методів машинного навчання. Враховуючи те, що для такої SoC необхідна велика кількість різних програмних компонентів, даний чіп повинен мати операційну систему. Непоганий вибір для таких цілей – сімейство плат Raspberry Pi [7, 8].

Raspberry Pi – міні комп'ютер, розроблений британським фондом Raspberry Pi Foundation. Початково

платформа Raspberry PI була створена для навчання дітей, школярів та студентів програмуванню. Проте платформа стала дуже популярною серед ентузіастів, тому зараз існує велика кількість проектів розроблених за допомогою саме неї.

Для реалізації системи автоматичної фіксації автомобільних номерів було обрано модель Raspberry PI 4B (рис. 2), яка має технічні характеристики наведені у табл. 1.

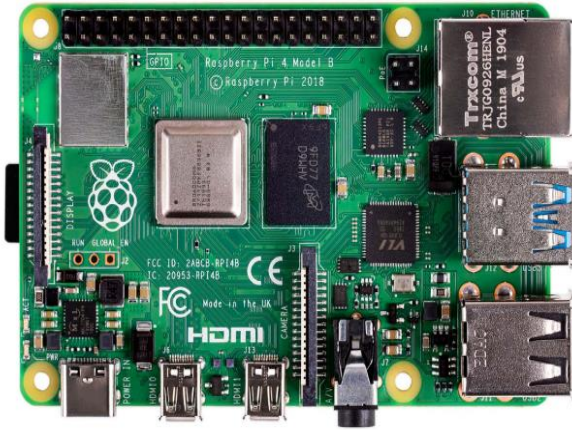


Рис. 2. Зовнішній вигляд плати Raspberry PI 4

Характеристики пропонованої SoC дозволяють створити інтелектуальну вбудовану систему, яка може проводити у режимі реального часу обробку зображень із використанням алгоритмів машинного і глибокого навчання, застосовуючи технології багатоварштових згорткових нейронних мереж [9, 10].

Таблиця 1 – Технічна характеристика обраної Raspberry PI

Процесор	Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
ОЗП	4GB LPDDR4
Зв'язок	2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac wireless LAN; Bluetooth 5.0; Gigabit Ethernet; 2 × USB 3.0 ports; 2 × USB 2.0 ports
Відео та звук	2 × micro HDMI ports (up to 4Kp60 supported); 2-lane MIPI DSI display port 2-lane MIPI CSI camera port; 4-pole stereo audio and composite video port
Пам'ять	Підтримка SD карт
Живлення	5V DC через USB-C (від 3A)

Огляд існуючих систем

Як вже було сказано, за допомогою Raspberry реалізовано дуже багато різних проектів, серед яких є й проекти розпізнавання автомобільних номерів. Один з можливих підходів – використовувати методи обробки зображення та бібліотеку OpenCV [11]. Проблема такого методу полягає у низькій точності розпізнавання на реальних зображеннях. Це пов'язано насамперед із проблемою розташування номера відносно камери, а також освітлення, різноманітних перешкод, тощо (рис. 3).

Інший підхід – це використання технологій на основі штучних нейронних мереж [12, 13]. У статті [14] було використано підхід у якому комбінувалися мережі YOLOv3, CRAFT Text Detector та CRNN. Такий

спосіб дозволив досягти розпізнавання номеру автомобілю у режимі реального часу, проте з наступними обмеженнями: розмір зображення 480x270 пікселів (фактично 416 по горизонталі), частота кадрів 30 FPS, верхні 45% відсотків зображення було обрізано (тобто реальне використовуване зображення було 416 на 135 пікселів). Всі ці обмеження були накладені також для можливості передачі зображень у мережі системи, оскільки обробка зображень відбувалась на сервері, а не на платі. Плата лише формувала відповідні черги для асинхронної обробки кожного нового кадру.

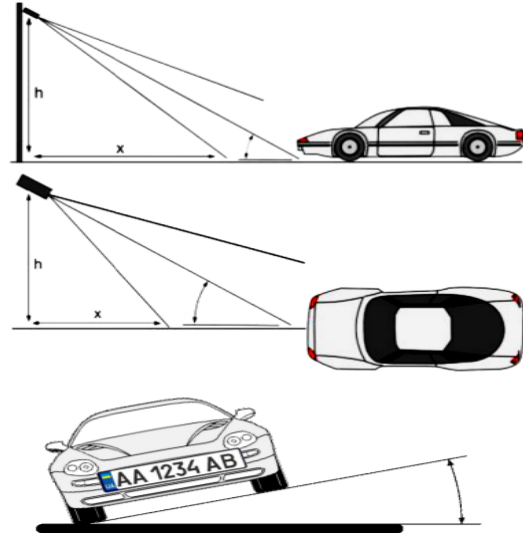


Рис. 3. Нахили відносно камери

Таким чином всі роботи можна звести до спеціалізованих методів обробки зображення, або до використання штучних нейронних мереж. Слід зазначити, що перший підхід не дає відмінного результату, оскільки результуюча якість сильно залежить від нахилу номеру відносно камери, а також такі методи, як правило, дуже чутливі до викривлень обумовлених шумами та освітленням.

Метод штучних нейронних мереж [15] у свою чергу має вагомий мінус у швидкодії і скоріше за все від розпізнавання у реальному часі доведеться відмовитися, якщо використовувати лише потужності SoC плати. Для реалізації було обрано методи глибокого навчання та SoC на Raspberry PI.

Нейронна мережа Mask R-CNN та реалізація на RaspberryPI

Для реалізації було обрано добре досліджену мережу Mask R-CNN [1, 16, 17]. Ця мережа показала відмінні результати на великих кутах розташування номерного знаку до камери [1]. Узагальнена схема роботи цих мереж з виділення окремих регіонів та розпізнавання об'єктів на них наведена на рис. 4 [17].

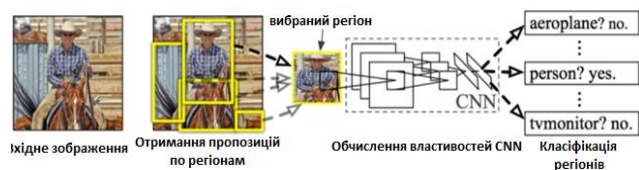


Рис. 4. Узагальнена схема роботи мережі Mask R-CNN

Ця мережа має інноваційний підхід до обробки зображення. Спочатку виконується звичайна згортка зображення для отримання карти ознак. Далі працює модуль генерації регіонів, котрий далі подається в мережу, схожу на R-CNN, тобто відбувається визначення класу для регіону. Відмінність Mask R-CNN від Faster R-CNN полягає у тому, що перша характеризує кожний піксель, тобто вирішує задачу instance segmentation. Проблема з цією мережею – наявність великої кількості модулів. Ця проблема повстає на етапі навчання, оскільки навчання кожного модуля окремо буде тривати дуже довго автори використали об'єднану функцію похибок. Слід зазначити, що частина цієї функції це точна копія функції похибок з Faster R-CNN:

$$L(p, t^u, v) = L_{cls}(p, u) + \lambda [u \geq 1] L_{loc}(t^u, v);$$

$$L_{cls}(p, u) = -u \log p - (1 - u) \log(1 - p);$$

$$L_{loc}(t^u, v) = \sum_{i \in \{x, y, w, h\}} L_1^{smooth}(t_i^u - v_i),$$

де u – клас об'єкту, котрий насправді представлено у регіоні; $L_{cls}(p, u)$ – логарифмічна функція похибок; $v = (v_x, v_y, v_w, v_h)$ – реальні розміри рамки об'єкту; $t^u = (t_x^u, t_y^u, t_w^u, t_h^u)$ – отримані рамки об'єкту для класу u ; L_{loc} – функція похибок між отриманими та реальним рамками об'єкту; λ – початковий коефіцієнт, котрий балансує вплив обох функцій похибок на результат (в оригінальній статті дорівнює одиниці, тобто вплив обох функцій однаковий);

$$L_1^{smooth}(x) = \begin{cases} 0.5x^2, & |x| < 1; \\ |x| - 0.5, & |x| \geq 1. \end{cases}$$

Комбінована функція для Mask R-CNN має такий вигляд:

$$L = L_{cls} + L_{loc} + L_{mask},$$

або (використовуючи Fr R-CNN):

$$L = L(p, t^u, v) + L_{mask};$$

$$L_{mask} = -m^{-2} \times$$

$$\times \sum_{1 \leq j, l \leq m} [y_{ij} \log y_{ij}^k + (1 - y_{ij}) \log(1 - y_{ij}^k)],$$

$m \times m$ – розміри маски; y_{ij} – клас клітинки (i, j) ; y_{ij}^k – визначений клас для тієї ж самої клітинки.

Іншими словами фінальна функція похибок це сума похибок Faster R-CNN та середня бінарна похибка крос-ентропії (cross entropy loss). Mask R-CNN була створена для вирішення задачі instance segmentation, тобто для визначення кожного окремого об'єкту та його класифікація. Ця система показала відмінні результати порівняно з конкурентними на зображеннях де номер розташований під великим кутом до камери [1]. Проблема з розгортанням системи почалися на етапі інсталяції необхідних компонентів. Для роботи ця мережа потребує наступні необхідні компоненти: Python 3.6, OpenCV 3.x, Tensorflow 1.13.x. Оскільки версії цих бібліотек доволі старі, то потрібно було встановлення старої версії Raspbery PI OS та розгортання кожного компоненту з piwheels.

Іншою проблемою був вибір камери: використувати PI Camera, чи звичайну USB-камеру, або

можливу камеру з інтерфейсом HDMI. Для простоти було вирішено використувати звичайну USB камеру, оскільки такий підхід більш доступний та універсальний. Розширення даної камери було 640×480.

Після встановлення всіх необхідних компонентів реалізація системи була дуже простою, отриманий результат наведено на рис. 5.



Рис. 5. Результат роботи системи на Raspberry PI

Як можна побачити запропонована система працює навіть із зображеннями під дуже великим кутом автомобільного номеру до камери. Це дає змогу встановлювати такі камери в широкому діапазоні значень висоти та кута номеру до камери. Таким чином ця система добре підходить для складних умов експлуатації, коли неможливо встановити камеру так, щоб номер був розташований під прямим кутом.

Проте недоліком даної реалізації на Raspberry PI є достатньо повільна робота системи, оскільки обробка одного зображення займала від 7 до 20 с. До переваг отриманої реалізації можливо віднести те, що дана система працює коректно при викривленнях зображень обумовлених геометричними факторами, опадами та недоліками освітлення, у великому діапазоні розрізень зображень, для різних форматів зображень а також може розпізнавати декілька номерів на зображенні одночасно.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Під час розгортання системи автоматичної фіксації автомобільних номерів на великих кутах зйомки вдалося досягти працюючої мережі вбудованими засобами Raspbery PI. Така потужна система, котра відмінно працює на великих кутах зйомки, потребує великої потужності. На жаль система працює повільно, отже дану реалізацію можливо використувати лише у застосунках, що не потребують режиму реального часу.

Оскільки дана система відмінно працює на великих кутах, то є можливість використувати її у комбінації з іншими системами, котрі будуть наприклад локалізувати номери, а надалі буде працювати запропонована система для визначення безпосередньо цих номерів. Крім того, можливість даної системи розпізна-

вати декілька номерів одночасно дає змогу використувати її у місцях великого скупчення автомобілів, де швидкість роботи системи не буде критичною.

Прикладом такого застосування може бути паркова зона, або стоянка, де швидкості навіть в одне зображення за хвилину буде достатньо для моніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kuchuk, H. System of license plate recognition considering large camera shooting angles / H. Kuchuk, A. Podorozhniak, N. Liubchenko, D. Onishchenko // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2021. – No. 4 (100). – pp. 82 – 91, <https://doi.org/10.32620/reks.2021.4.07>.
2. Подорожняк, А.О. Інтелектуальна система розпізнавання номерів автотранспортних засобів / А.О. Подорожняк, Н.Ю. Любченко, Д.П. Оніщенко // *The I International Science Conference on Multidisciplinary Research*, January 19 – 21, 2021, Berlin, Germany. – Berlin, 2021. – pp. 1051-1055, <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.I.I>.
3. Liew, C. Real time mobile based license plate recognition system with neural networks / C. Liew, C.O. Kim, R. Alfred, T.G. Tse, P. Anthony // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1502. – Iss. 1. – Article number 012032, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1502/1/012032>.
4. Адреси камер фотовідеофіксації та дозволена швидкість руху. Офіційний сайт МВС України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mvs.gov.ua/uk/ministry/projekti-mvs/avtofotovideofiksiaciya-porusen-pdr/adresi-kamer-fotovideofiksiaciyi-ta-dozvolena-svidkist-ruxu-1>.
5. Liubchenko, N. Automation of vehicle plate numbers identification on one-aspect images / N. Liubchenko, O. Nakonechnyi, A. Podorozhniak, H. Siulieva // *Advanced Information Systems*. – 2018. – No. 1. – pp. 52 – 55, <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.10>.
6. Anuar, F. Smart campus initiative: car entrance, exit and parking management prototype development / F. Anuar, N. Lingas // *8th Brunei International Conference on Engineering and Technology 2021*, November 8 – 10, 2021, Bandar Seri Begawan, Brunei. – AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2643. – Article number 040029, <https://doi.org/10.1063/5.0110444>.
7. Podorozhniak, A. Research of the multispectral imaging analysis system based on Raspberry Pi / A. Podorozhniak, M. Kvochka // *Проблеми інформатизації: тези доповідей дев'ятої міжнародної НТК*. 18-19 листопада 2021 року, т. 2 – Черкаси: ЧДТУ; Баку: ВА ЗС АР, Бельсько-Бяла: УТІГН, Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ІД ПКНДІ АП"; 2021. – С. 68. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/58381/1/Podorozhniak_Research_2021.pdf.
8. Jabbar, W.A. An IoT Raspberry Pi-based parking management system for Smart Campus / W.A. Jabbar, C.W. Wei, N.A.A.M. Azmi, N.A. Hainonnazli // *Internet of Things*. – 2021. – Vol. 14. – Article number 100387, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100387>.
9. Abdellatif, M.M. A low cost IoT-based Arabic license plate recognition model for smart parking systems / M.M. Abdellatif, N.H. Elshabasy, A.E. Elashmawy, M. AbdelRaheem // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2023. – Article number 102178, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102178>.
10. Yang, Z. Research on deep learning garbage classification system based on fusion of image classification and object detection classification / Z. Yang, Y. Bao, Y. Liu, Q. Zhao, H. Zheng, Y. Bao // *Mathematical Biosciences and Engineering*. – 2022. – Vol. 20. – Iss. 3. – pp. 4741-4759, <https://doi.org/10.3934/mbe.2023219>.
11. License Plate Recognition using Raspberry Pi and OpenCV [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/license-plate-recognition-using-raspberry-pi-and-opencv>.
12. Подорожняк, А. Нейромережева система розпізнавання автономера / А. Подорожняк, Н. Любченко, Г. Гейко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 4 (62). – С. 88-91, <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.4.088>.
13. Firasanti, A. License Plate Detection using OCR method with Raspberry Pi / A. Firasanti, T.E. Ramadhani, M.A. Bakri, N.E.A.A.O. Zaki // *15th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA-2021)*, 18-19 November 2021, Bali, Indonesia. – Bali, 2021, <https://doi.org/10.1109/TSSA52866.2021.9768252>.
14. Chiriac, R.L. I built a DIY license plate reader with a Raspberry Pi and machine learning [Електронний ресурс]. – URL: <https://towardsdatascience.com/i-built-a-diy-license-plate-reader-with-a-raspberry-pi-and-machine-learning-7e428d3c7401>.
15. Parzhin, Y. Detector neural network vs connectionist ANNs / Y. Parzhin, V. Kosenko, A. Podorozhniak, O. Mal'yeyeva, V. Timofeyev // *Neurocomputing*. – 2020. – Vol. 414. – pp. 191 – 203, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.025>.
16. He, K. Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick // *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, October 22-29 2017. – Venice, 2017. – pp. 2980-2988, <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.322>.
17. Parthasarathy, D. A Brief History of CNNs in Image Segmentation: From R-CNN to Mask R-CNN [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://blog.athelas.com/a-brief-history-of-cnns-in-image-segmentation-from-r-cnn-to-mask-r-cnn-34ea83205de4>.

Received (Надійшла) 15.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.03.2023

Implementation of automatic license plate recognition system with Raspberry PI

A. Podorozhniak, N. Liubchenko, D. Petrukovich, D. Onishchenko

Abstract. The object of study in the article is machine learning methods for automatic license plate recognition. The goal is to implement the system of automatic license plate recognition with Raspberry PI 4. The main tasks of this research are to analyse systems of automatic license plate recognition that implemented with capabilities of Raspberry PI and to implement own system. As a result of research of similar systems common problems were discovered and resolved. The developed system uses modern approach and technologies of artificial convolutional neural networks to solve occurred problems. It is important to note that the implemented system performs better than similar systems for large shooting angles. As a result of the work automatic license plate recognition system using Raspberry PI boards for intelligent embedded systems was implemented. Research has been conducted and the great potential of the proposed development has been revealed in environments where the speed of the system will not be critical.

Keywords: license plate recognition system, machine learning algorithms, deep learning methods, convolutional neural networks, intelligent embedded systems, Raspberry PI.

О. Є. Пономаренко, В. О. Горбачов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

АГРЕГАЦІЯ СТРУКТУРНОЇ МОДЕЛІ СКЛАДНИХ МЕРЕЖНИХ СИСТЕМ

Анотація. Складні системи потребують спеціальних методів аналізу та проектування. Основна мета цих методів полягає в тому, щоб зменшити розмір системи. Потрібно знайти простіше представлення таких систем зі збереженням властивостей системи початкової розмірності. В роботі розглядаються формальні перетворення структурної моделі системи за допомогою агрегації. Цей підхід допомагає зменшити розмірність та обчислювальну складність системи. **Предметом дослідження** є методи перетворення структурної моделі систем. **Метою роботи** є дослідження агрегації структурної моделі систем, що забезпечує зменшення розмірності, обчислювальної складності та часу вирішення проблеми. **Актуальність роботи** полягає у тому, що ряд проблем може вирішуватися на більш високому рівні ієрархії системи, який можна отримати в результаті агрегації структурної моделі системи. В роботі були **вирішені наступні задачі**: перетворення структурної моделі системи та створення ієрархічної системи за допомогою агрегації; оцінка ефективності перетворення структурної моделі системи за допомогою вирішення задачі пошуку максимального потоку. **В результаті дослідження** була створена ієрархічна система; продемонстрована ефективність методу на прикладі вирішення задачі про максимальний потік. Результати оцінки ефективності перетворень структурної моделі системи: зменшуються кількість елементів в системі, кількість зв'язків між елементами в системі та кількість ітерацій обходу графа; значення максимального потоку є однаковим для двох рівнів системи. Дослідження дозволяють зробити **висновки**: методи перетворення структурної моделі забезпечують простіше представлення складних систем, зберігаючи при цьому топологічні властивості системи на більш високому рівні; в результаті агрегації структурної моделі зменшується розмірність системи, обчислювальна складність та час вирішення проблеми; агрегація надає ефективні способи обчислення бажаних величин для систем завдяки зменшенню розмірності системи.

Ключові слова: агрегація структурної моделі, перетворення структурної моделі, складні системи, зменшення розмірності системи, максимальний потік.

Вступ

Складні системи зустрічаються в багатьох сферах та характеризуються великою розмірністю та обчислювальною складністю. Останнім часом було розроблено велику кількість нових інструментів та методів для роботи з різними великомасштабними складними мережами [1].

Мережі використовуються як загальна модель множини складних систем. Складна система містить велику кількість елементів та зв'язків між ними. Якщо мати на увазі опис системи на рівні окремих одиниць, може бути корисним розділити елементи системи на групи, які можна розглядати як підсистеми, та отримати ефективні взаємодії між ними. Таким чином, можна отримати опис на більш високому рівні системи.

Багато складних систем можна представити як багаторівневі мережі, що складаються з окремих елементів, які взаємодіють і залежать один від одного, та мають нетривіальні топологічні властивості [2].

Складні системи потребують спеціальних методів аналізу та проектування, основна мета яких полягає в тому, що вони зменшують систему до меншого виміру, використовуючи її агрегацію або декомпозицію.

Існує три групи задач для складних систем: аналіз властивостей та поведінки системи в залежності від її структури та значення її параметрів; вибір структури та значень параметрів на основі властивостей системи; побудова складних систем.

Дана робота присвячена агрегації як методу перетворення структурної моделі складних систем з метою зменшення розмірності системи, коли час відіграє важливу роль у вирішенні задач керування в

реальному часі та коли час моделювання системи є критичним параметром.

Актуальність роботи полягає у тому, що деякі проблеми можуть бути вирішені на більш високому рівні ієрархії системи. Для цього здійснюється агрегація структурної моделі, яка полягає в об'єднанні елементів системи у підсистеми, в результаті чого формується ієрархічна система. Перевагою цього підходу є зменшення кількості елементів системи та зв'язків між ними, зменшення розмірності системи, обчислювальної складності та часу вирішення проблеми.

Аналіз літератури

За останній час зросла кількість робіт, які присвячені вивченню складних мереж або, іншими словами, складних систем з мережевою топологією. Мережі використовуються як загальна модель різноманітних складних систем.

Використовується наступна класифікація складних мереж [3]: технологічні, біологічні, екологічні та соціальні. Значна увага приділяється теорії мереж, мережевому моделюванню.

Математична модель системи складається з двох частин: опису її елементів і опису структури системи. Формальна техніка, що описує математичні моделі систем, включає теорію масового обслуговування, мережі Петрі, алгебру процесів і теорію множин.

Ряд проблем системного аналізу потребує дослідження структурної моделі складної системи. При цьому деякі проблеми вирішуються лише шляхом перетворення існуючої структури в таку, що дозволяє досягти вирішення поставлених перед дослідженням завдань.

Автори [4] застосовують агрегацію елементів мережі масового обслуговування з метою зменшення її розмірності та скорочення часу моделювання. Моделювання реальної системи може зайняти багато часу, тому необхідні методи для моделювання великих систем з відповідним балансом точності та швидкості. Основний підхід полягає в тому, щоб розділити мережу на дві підмережі: S та R . Підмережа S містить основні вузли, а підмережа R містить інші вузли. Мета полягає в перетворенні підмережі R до меншої підмережі R^* таким чином, щоб моделювання S з R^* наближалось до моделювання S з R . Показники продуктивності S повинні бути однаковими в обох мережах, але показники продуктивності в R^* та R не обов'язково повинні співпадати. Таким чином, підмережа R зводиться до меншої підмережі R^* , тому перетворена мережа менша, ніж початкова мережа.

Автори [5] досліджують схеми агрегації марковських процесів. Підхід полягає в тому, щоб об'єднати стани марковського процесу в групи та запропонувати марковський процес на множині груп, який має агреговану стаціонарну ймовірність. Потенційними перевагами є ефективні обчислення, включаючи повторне обчислення для врахування локальних змін.

Автори [6] розглядають метод дослідження складної системи на основі її декомпозиції. Метод полягає у декомпозиції великомасштабних моделей у взаємопов'язаний граф логічних процесів, здатних одночасно обробляти події моделювання на сучасних паралельних платформах.

Метод зменшує розмірність моделі системи та покращує продуктивність моделювання системи на паралельних платформах.

Агрегація використовується в статті [7] для пошуку найкоротших шляхів у графі. Це може бути застосовано в розробці супутникової навігації, щоб мати можливість реагувати в режимі реального часу на оновлення дорожнього трафіку.

Вирішення задач топологічного аналізу потребує великих обчислювальних ресурсів і розвитку математичних методів. Такі задачі можна об'єднати в наступні групи.

1. Розробка структурного опису складної системи. До цієї групи належать завдання, що визначають топологічну структуру системи: визначення елементів та підсистем складної системи, визначення зв'язків між ними.

2. Визначення характеристик складної системи із заданою топологічною структурою, наприклад, визначення найкоротших шляхів, циклів. Також модель структури системи використовується для аналізу показників якості структури, наприклад, аналіз кількості зв'язків між підсистемами, пропускної здатності або інших характеристик каналів, швидкості передачі повідомлень по каналах.

3. Еквівалентні перетворення топологічної структури складної системи.

Більшість завдань третьої групи є завданнями підвищеної складності. Проектування структури мережевих систем є одним з основних завдань і полягає у виборі оптимальної схеми з'єднання вузлів та виборі пропускної здатності каналів.

У цій роботі розглядається задача еквівалентних перетворень структурної моделі системи, яка належить до третьої групи задач топологічного аналізу. Еквівалентні перетворення можна застосувати в наступних випадках: перерозподіл зв'язків і схем взаємодії в рамках початкової структури; агрегація та декомпозиція компонентів системи; зменшення розмірності системи, коли час відіграє важливу роль у вирішенні завдань управління в реальному часі, а також, коли час моделювання системи є критичним параметром [8].

Формальний опис агрегації структурної моделі системи

В цьому розділі розглядається побудова моделі структури системи та алгоритм агрегації структурної моделі системи. Розглядаються задачі перетворення схеми зв'язку елементів.

Система S складається з елементів C_1, C_2, \dots, C_N та зовнішнього середовища C_0 [9]. Елементи системи мають вхідні контакти $X_i^{(i)}$, де $i = 1, 2, \dots, m$ і вихідні контакти $Y_l^{(i)}$, де $l = 1, 2, \dots, r$. Елемент C_j містить m_j вхідних контактів; контакт $X_i^{(j)}$ приймає елементарні сигнали $x_i^{(j)}(t)$; $i=1, 2, \dots, m_j$; $j=1, 2, \dots, N$. Елемент C_j містить r_j вихідних контактів; контакт $Y_l^{(j)}$ видає елементарні сигнали $y_l^{(j)}(t)$; $l = 1, 2, \dots, r_j$.

Зовнішнє середовище системи представляється фіктивним елементом C_0 , який містить m_0 вхідних контактів $X_i^{(0)}$ та r_0 вихідних контактів $Y_l^{(0)}$. Таким чином, кожен C_j елемент системи S характеризується множиною вхідних контактів $X_1^{(j)}, X_2^{(j)}, \dots, X_{m_j}^{(j)}$ та множиною вихідних контактів $Y_1^{(j)}, Y_2^{(j)}, \dots, Y_{r_j}^{(j)}$.

Для формального опису з'єднання елемента C_j з іншими елементами та зовнішнім середовищем використовується математична модель, що складається з множин $[X_i^{(j)}]_1^m$ та $[Y_l^{(j)}]_1^r$, де i – номер вхідного контакту, $i=1, 2, \dots, m$; l – номер вихідного контакту, $l=1, 2, \dots, r$; j – номер елемента системи, $j=1, 2, \dots, N$.

До вхідного контакту будь-якого елемента системи підключається не більше ніж один елементарний канал, а до вихідного контакту може бути підключено будь-яке кінцеве число елементарних каналів за умови, що до входу одного і того ж елемента системи направляється не більше ніж один зі згаданих елементарних каналів.

Згідно з припущенням, що кожному вхідному контакту $X_i^{(j)}$ відповідає не більше ніж один вихідний контакт $Y_l^{(k)}$, вводиться однозначний оператор [10]:

$$Y_l^{(k)} = R(X_i^{(j)}), \quad (1)$$

де область визначення на множині:

$$\bigcup_{j=0}^N [X_i^{(j)}]_1^m, \quad (2)$$

та область значень на множині:

$$\bigcup_{k=0}^N [Y_l^{(k)}]_1^r. \quad (3)$$

Оператор (1) з областю визначення та областю значень називається схемою сполучення елементів в системі S і оператором сполучення або формальною моделлю структури системи.

Схема першого рівня системи представлена на рис. 1.

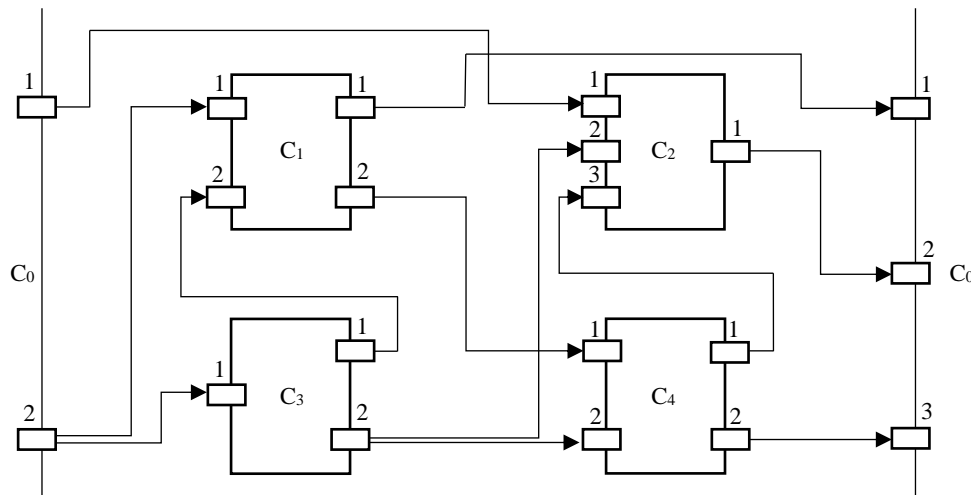


Рис. 1. Схема першого рівня системи

Оператор сполучення елементів в системі можна задати у вигляді таблиці, де на перетині рядків з номерами елементів системи (j) та стовпців з номерами її вхідних контактів (i) розташовуються пари чисел (k, l), що вказують номер елемента (k) та номер вихідного контакту (l), з яким з'єднаний контакт $X_i^{(j)}$.

Сполучення елементів першого рівня системи представлені у табл. 1.

Таблиця 1 – Сполучення елементів на першому рівні системи

i\j	1	2	3
0	1,1	2,1	4,2
1	0,2	3,1	-,-
2	0,1	3,2	4,1
3	0,2	-,-	-,-
4	1,2	3,2	-,-

Відповідність між $Y_l^{(k)}$ і $X_i^{(j)}$, що описується оператором (1), не є взаємно однозначною. Таким чином, маємо неоднозначний оператор:

$$X_i^{(j)} = R^{-1}(Y_l^k), \tag{4}$$

де $X_i^{(j)}$ – вхідні контакти елемента; $Y_l^{(k)}$ – вихідні контакти елемента.

Перший етап агрегації полягає в об'єднанні елементів у підсистемі. Складна система S розділяється на підсистеми S_μ , де $\mu = 1, 2, \dots, M$, які містять не менше ніж один елемент. Елемент C_j може входити лише в одну з підсистем S_μ . Якщо елемент C_j не входить ні в одну з підсистем, то цей елемент самостійно формує підсистему, наприклад, $S_{\mu 0}$. Здійснимо агрегацію таким чином: $S_{\mu 0} = \{C_0\}$; $S_{\mu 1} = \{C_1, C_3\}$; $S_{\mu 2} = \{C_2, C_4\}$.

Наступним етапом агрегації є визначення фіктивних контактів підсистеми.

Підсистема S_μ є одночасно і складною системою, подібно системі S, і елементом системи S.

У першому випадку підсистема S_μ розглядається як самостійна система та повинна мати зовнішнє середовище, що представляється фіктивним елементом C_0^μ . Внутрішня структура зовнішнього середовища є невидимою для елементів підсистеми S_μ . У цьому випадку зовнішнє середовище, яке представ-

ляється фіктивним елементом C_0^μ , взаємодіє з підсистемою S_μ через свої вхідні контакти $X_i^{(0)\mu}$, які з'єднані з виходами елементів підсистеми S_μ , а також через вихідні контакти $Y_l^{(0)\mu}$, які з'єднані з входами елементів підсистеми S_μ .

У другому випадку підсистема S_μ розглядається як елемент системи S. Внутрішня структура підсистеми S_μ є невидимою для інших підсистем системи S. Кожна підсистема на межі повинна мати фіктивні вхідні $X_i^{(\mu)}$ і фіктивні вихідні $Y_l^{(\mu)}$ контакти для зв'язку з іншими підсистемами системи S.

Таким чином, пара контактів $X_i^{(\mu)}$ та $Y_l^{(0)\mu}$, а також $X_i^{(0)\mu}$ та $Y_l^{(\mu)}$ об'єднуються в «подвійні» фіктивні контакти на межі підсистеми S_μ (рис. 2). Введення поняття фіктивних контактів відіграє важливу роль для кожної підсистеми S_μ . При необхідності підсистему S_μ можна замінити на нову, завдяки чому можна покращити продуктивність системи S або розширити функціональність.

Існує дві множини контактів елементів підсистеми S_μ :

– множина вихідних контактів всіх елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$, які з'єднані елементарними каналами з вхідними контактами елементів C_k , де $C_k \notin S_\mu$, а також з вхідними контактами фіктивного елемента C_0 :

$$[Y_l^{(j)}]_\mu, \tag{5}$$

де μ – номер підсистеми;

– множина вхідних контактів всіх елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$, з'єднаних елементарними каналами з вихідними контактами елементів C_k , де $C_k \notin S_\mu$, а також з вихідними контактами фіктивного елемента C_0 :

$$[X_l^{(j)}]_\mu, \tag{6}$$

де μ – номер підсистеми.

Для множини контактів елементів підсистеми S_μ потрібно визначити фіктивні контакти, що з'являються при поділі системи S на підсистеми S_μ . В результаті буде сформовано дві групи фіктивних контактів: перша група характеризує підсистему S_μ як складну систему, а друга група контактів характеризує підсистему як елемент системи S.

Розглянемо множину $[Y_1^{(i)}]_\mu$ всіх елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$, які з'єднані елементарними каналами з вхідними контактами елементів C_k , де $C_k \notin S_\mu$, а також з вхідними контактами фіктивного елемента C_0 .

Кожному $Y_1^{(i)} \in [Y_1^{(i)}]_\mu$ ставиться у відповідність пара операторів:

$$Y_l^{(\mu)} = Q_\mu(Y_l^{(j)}), \quad (7)$$

$$X_i^{(0)\mu} = Q'_\mu(Y_l^{(j)}). \quad (8)$$

Оператори (7), (8) називаються операторами нумерації фіктивних контактів підсистеми S_μ , пов'язаних з контактами $Y_1^{(i)}$ всіх елементів C_j , що належать підсистемі S_μ , і з'єднаних елементарними каналами з вхідними контактами елементів C_k , котрі належать до підсистеми S_μ , і з вхідними контактами фіктивного елемента C_0 . Оператори Q_μ та Q'_μ задаються таблицею нумерації фіктивних контактів.

Алгоритм формування фіктивних контактів для множини $[Y_1^{(i)}]_\mu$ полягає в наступному. На першому етапі для підсистеми S_μ формується множина $[Y_1^{(i)}]_\mu$. Потім визначаються контакти, що належать елементу C_j , де $C_j \in S_\mu$. На другому етапі кожному $Y_1^{(i)}$ з цієї множини ставиться у відповідність пара фіктивних контактів, які після нумеруються з використанням операторів (7), (8). Нумерація фіктивних контактів підсистеми $S_{\mu 2}$, підключених до контактів множини $[Y_1^{(i)}]_{\mu 1}$, представлена у табл. 2.

Таблиця 2 – Таблиця нумерації фіктивних контактів підсистеми $S_{\mu 2}$, підключених до контактів множини $[Y_1^{(i)}]_{\mu 1}$

Оператор	2,1	4,2
$Q_{\mu 1}$	1	2
$Q'_{\mu 1}$	1	2

Розглянемо множину $[X_1^{(i)}]_\mu$ всіх елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$, з'єднаних елементарними каналами з вихідними контактами елементів C_k , де $C_k \notin S_\mu$, а також з вихідними контактами фіктивного елемента C_0 .

Вводяться оператори нумерації фіктивних контактів:

$$X_i^{(\mu)} = P_\mu(X_i^{(j)}), \quad (9)$$

$$Y_l^{(0)\mu} = P'_\mu(X_i^{(j)}). \quad (10)$$

Оператори (9), (10) формують фіктивні контакти підсистеми S_μ , які пов'язані з контактами $X_1^{(i)}$ всіх елементів $C_j \in S_\mu$ і з'єднані елементарними каналами з вихідними контактами елементів $C_k \notin S_\mu$ і з вихідними контактами фіктивного елемента C_0 . Розглянуті оператори можуть бути представлені у вигляді таблиць фіктивних контактів.

Алгоритм формування фіктивних контактів для множини $[X_1^{(i)}]_\mu$ полягає в наступному.

На першому кроці для підсистеми S_μ формується множина $[X_1^{(i)}]_\mu$. Потім визначаються контакти, що належать елементу C_k , де $C_k \notin S_\mu$.

На другому кроці кожному $X_1^{(i)}$ ставиться у відповідність пара фіктивних контактів, які потім нумеруються з використанням операторів (9), (10).

Нумерація фіктивних контактів підсистеми $S_{\mu 2}$, підключених до контактів множини $[X_1^{(i)}]_{\mu 1}$, представлена у табл. 3.

Таблиця 3 – Таблиця нумерації фіктивних контактів підсистеми $S_{\mu 2}$, підключених до контактів множини $[X_1^{(i)}]_{\mu 1}$

Оператор	2,1	4,1	2,2	4,2
P_μ	1	2	3	3
P'_μ	1	2	3	3

Наступним етапом агрегації є визначення зв'язків між елементами в підсистемі. Розглянемо підсистему S_μ як самостійну систему, тобто C_0 і всі інші компоненти системи S представляють для S_μ зовнішнє середовище $C_0^{(w)}$. При побудові схеми сполучення необхідно враховувати два типи з'єднань. У першому випадку – це внутрішні з'єднання вхідних і вихідних контактів елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$. У другому випадку – це з'єднання вхідних і вихідних контактів елементів C_j , що належать S_μ , з вхідними та вихідними контактами елемента $C_0^{(w)}$, що представляє зовнішнє середовище по відношенню до підсистеми S_μ .

У першому випадку множини $[X_1^{(i)}]_{\mu 1}^m$ та $[Y_1^{(i)}]_{\mu 1}^r$ контактів для елементів $C_j \in S_\mu$ задані, а оператор сполучення R_μ дорівнює R .

У другому випадку підсистема S_μ повинна мати контакти $X_1^{(0)\mu}$ та $Y_1^{(0)\mu}$, що з'єднують відповідно входи фіктивного елемента $C_0^{(w)}$ з виходами елементів підсистеми S_μ , також виходи фіктивного елемента $C_0^{(w)}$ з входами елементів підсистеми S_μ . Таким чином, оператор Q'_μ визначає вхідні контакти $X_1^{(0)\mu}$, та оператор P'_μ визначає вихідні контакти $Y_1^{(0)\mu}$.

$$[X_i^{(0)\mu}]_{\mu 1}^m = Q'_\mu([Y_l^{(j)}]_{\mu 1}^r). \quad (11)$$

$$[Y_l^{(0)\mu}]_{\mu 1}^r = P'_\mu([X_i^{(j)}]_{\mu 1}^m). \quad (12)$$

Схема сполучення для підсистеми S_μ як самостійної системи буде визначена за допомогою оператора сполучення R_μ – внутрішнього оператора сполучення елементів в підсистемі S_μ :

$$Y_l^{(k)} = R_\mu(X_i^{(j)}). \quad (13)$$

Сполучення елементів підсистеми $R_{\mu 2}$ представлені у табл. 4.

Таблиця 4 – Таблиця сполучення елементів підсистеми $R_{\mu 2}$

$i \setminus j$	1	2	3
0	2,1	4,2	-, -
2	0,1	0,3	4,1
4	0,2	0,3	-, -

Наступним етапом агрегації є побудова другого рівня системи. Підсистема S_μ може розглядатися як елемент системи S . Підсистема характеризується:

- множиною $[X_1^{(i)}]_\mu$, яка позначає множину вхідних контактів всіх елементів $C_j \in S_\mu$, з'єднаних

елементарними каналами з вихідними контактами елементів $C_k \notin S_\mu$ і вихідними контактами фіктивного елемента C_0 ;

- множиною $[Y_l^{(i)}]_\mu$, яка позначає множину вихідних контактів $Y_l^{(i)}$ всіх елементів C_j , що належать підсистемі S_μ , які з'єднані елементарними каналами з вхідними контактами елементів $C_k \notin S_\mu$ і вхідними контактами фіктивного елемента C_0 ;

- множиною фіктивних вхідних контактів $[X_i^{(\mu)}]_1^m$, де $X_i^{(\mu)}$ – вхідний контакт підсистеми;

- множиною фіктивних вихідних контактів $[Y_l^{(\mu)}]_1^r$, де $Y_l^{(\mu)}$ – вихідний контакт підсистеми.

Для побудови схеми сполучення підсистем S_μ , $\mu = (\mu_0, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M)$ в системі S вводиться оператор сполучення підсистем:

$$Y_l^{(v)} = R_{II}(X_i^{(\mu)}), \tag{14}$$

де область визначення на множині:

$$\cup_{\mu=0}^M [X_i^{(\mu)}]_1^m, \tag{15}$$

область значень на множині:

$$\cup_{\mu=0}^M [Y_l^{(\mu)}]_1^r, \tag{16}$$

де M – кількість підсистем в системі.

Оператор (14) вхідному фіктивному контакту $X_i^{(\mu)}$ ставить у відповідність вихідний фіктивний

контакт $Y_l^{(v)}$, з'єднаний з $X_i^{(\mu)}$ елементарним каналом, якщо таке з'єднання в системі S існує. Для фіктивного контакту $X_i^{(\mu)}$ визначається пов'язаний з ним один з контактів $X_i^{(i)}$:

$$X_i^{(j)} = P_\mu^{-1}(X_i^{(\mu)}), \tag{17}$$

де $X_i^{(i)}$ – вхідний контакт елемента C_j , де $C_j \in S_\mu$. Оператор $P_\mu^{-1}(X_i^{(\mu)})$ є неоднозначним, тому в результаті може виявитися більше ніж один контакт $X_i^{(i)}$ для фіктивного контакту.

Сукупність схеми сполучення R_{II} підсистем S_μ в системі S і схем сполучення R_μ елементів C_j в підсистемах S_μ називаються дворівневою схемою сполучення системи S .

Сполучення елементів на другому рівні системи представлені у табл. 5.

Схема другого рівня системи представлена на рис. 2.

Таблиця 5 – Сполучення елементів на другому рівні системи

i\j	1	2	3
0	1,1	2,1	2,2
1	0,2	-, -	-, -
2	0,1	1,2	1,3

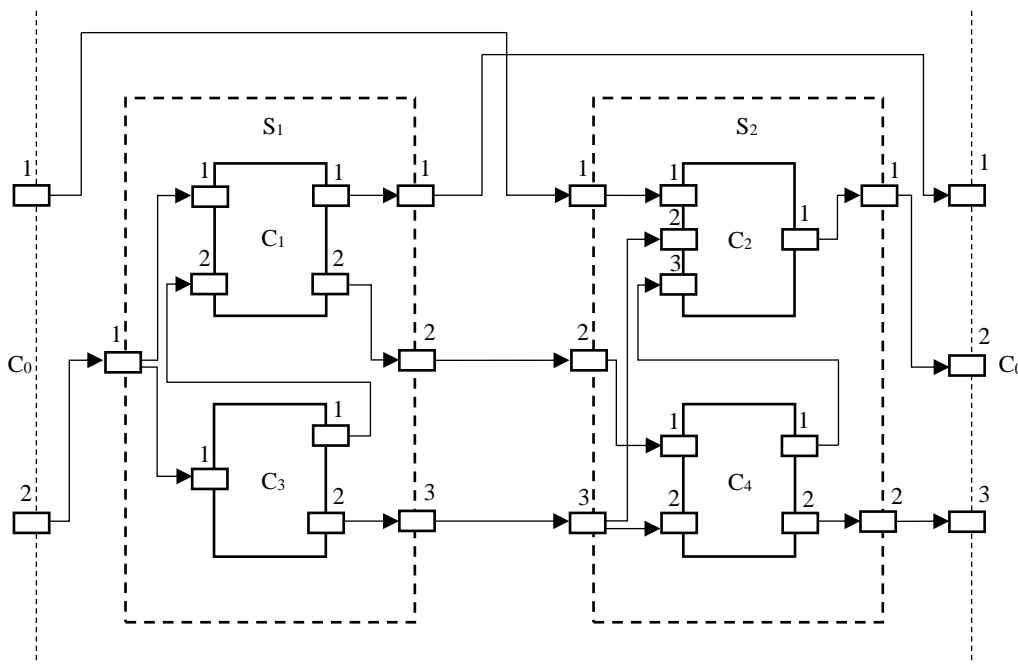


Рис. 2. Схема другого рівня системи

Оцінка ефективності перетворень структурної моделі системи

Для оцінки ефективності перетворення структурної моделі системи можна вирішити задачу про максимальний потік для кожного рівня ієрархічної системи. Задача про максимальний потік полягає в тому, щоб отримати значення максимального потоку мережі для заданої топології [11]. Задача про максимальний потік формулюється таким чином. Необхідно

знайти максимальне можливе для даної мережі значення сумарного потоку між джерелом та стоком при заданих пропускних здатностях дуг мережі. Якщо потік не досяг максимального значення, то треба визначити, як його збільшити.

Для вирішення задачі про пошук максимального потоку використовується теорема, що була доведена Фордом та Фалкерсоном, згідно з якою максимальне значення сумарного потоку на кінцевих дугах дорівнює мінімальній пропускній здатності

обраного розрізу [12]. Під пропускну здатністю розрізу мається на увазі сума пропускну здатностей дуг, що утворюють розріз.

Алгоритм Форда-Фалкерсона включає наступні кроки:

- пошук на графі ланцюга з джерела в стік;
- для кожної дуги ставиться максимальне можливе значення потоку з джерела в стік, значення потоку не може бути більшим ніж вага дуги;
- якщо значення потоку дорівнює вазі дуги, то така дуга є насиченою, та через неї вже не можна пройти під час вибору ланцюгів у графі;
- алгоритм завершується тоді, коли перехід з джерела в стік стане неможливим.

Після завершення дії алгоритму значення максимального потоку дорівнює сумі потоків всіх дуг, інцидентних стоку графа.

Сполучення елементів першого рівня системи зі значеннями пропускну здатності представлені у табл. 6.

Таблиця 6 – Сполучення елементів на першому рівні системи зі значеннями пропускну здатності

i\j	1	2	3
0	1,1,11	2,1,15	4,2,19
1	0,2,27	3,1,5	-,-,-
2	0,1,25	3,2,7	4,1,5
3	0,2,29	-,-,-	-,-,-
4	1,2,9	3,2,15	-,-,-

Вирішимо задачу пошуку максимального потоку для першого рівня системи. Граф першого рівня системи представлений на рис. 3.

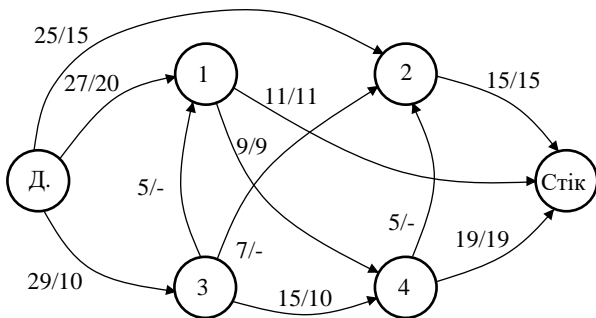


Рис. 3. Граф першого рівня системи

Результат обходу графа для першого рівня системи представлений у табл. 7.

Таблиця 7 – Результат обходу графа для першого рівня системи

№	Шлях	Значення потоку
1	Джерело–2–Стік	15
2	Джерело–1–Стік	11
3	Джерело–1–4–Стік	9
4	Джерело–3–4–Стік	10

Максимальний потік мережі визначається за формулою:

$$f = \sum_{i=1}^n f_i, \tag{18}$$

де n – кількість ребер, інцидентних стоку;

f_i – величина потоку ребра, інцидентного стоку;

За формулою (18) був знайдений максимальний потік мережі:

$$f_1 = 15 + 11 + 9 + 10 = 45 \tag{19}$$

В результаті агрегації структурної моделі був отриманий другий рівень системи. Сполучення елементів другого рівня системи зі значеннями пропускну здатності представлені у табл. 8.

Таблиця 8 – Сполучення елементів на другому рівні системи зі значеннями пропускну здатності

i\j	1	2	3
0	1,1,11	2,1,15	2,2,19
1	0,2,56	-,-,-	-,-,-
2	0,1,25	1,2,9	1,3,22

Вирішимо задачу пошуку максимального потоку для другого рівня системи. Граф другого рівня системи представлений на рис. 4.

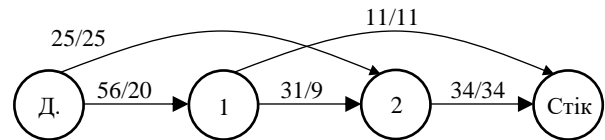


Рис. 4. Граф другого рівня системи

Результат обходу графа для другого рівня системи представлений у табл. 9.

Таблиця 9 – Результат обходу графа для другого рівня системи

№	Шлях	Значення потоку
1	Джерело–2–Стік	25
2	Джерело–1–Стік	11
3	Джерело–1–2–Стік	9

За формулою (18) був знайдений максимальний потік мережі:

$$f_2 = 25 + 11 + 9 = 45 \tag{20}$$

В результаті вирішення задачі значення максимального потоку однакове на двох рівнях системи. Тому можна зробити висновок, що в даному випадку перетворення структурної моделі системи є еквівалентними.

В результаті перетворень структурної моделі системи зменшуються розмірність системи, обчислювальна складність та час вирішення задачі. Результати оцінки ефективності перетворень структурної моделі системи: кількість елементів в системі зменшилась на 33%, кількість зв'язків між елементами в системі зменшилась на 36%, кількість ітерацій обходу графа зменшилась на 25%.

Висновки

У роботі була розглянута агрегація як метод перетворення структурної моделі системи, що забезпечує зменшення розмірності та обчислювальної складності системи. Було продемонстровано, що методи перетворення структурної моделі системи забезпечують простіше представлення систем, зберігаючи при цьому топологічні властивості більш високого рівня системи.

У роботі був представлений формальний опис агрегації структурної моделі системи на прикладі створення ієрархічної структури системи.

Для оцінки ефективності перетворення структурної моделі системи була вирішена задача про максимальний потік для кожного рівня ієрархічної системи. Було визначено, що в результаті перетворень

структурної моделі системи зменшуються кількість елементів системи, кількість зв'язків між елементами системи та кількість ітерацій обходу графа, але значення максимального потоку є однаковим для двох рівнів системи.

Тому можна зробити висновок, що в результаті агрегації структурної моделі системи зменшуються розмірність системи, обчислювальна складність та час вирішення проблеми; на розглянутому прикладі можна здійснити зменшення розмірності системи зі збереженням коректності її параметрів.

Подальша робота полягає в застосуванні агрегації структурної моделі для зменшення розмірності складних систем з дуже великою кількістю елементів та зв'язків між ними. Це дозволить оцінити ефективність розглянутого методу для вирішення різних задач оптимізації, пов'язаних з великими мережами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Newman M. (2010), *Networks: An Introduction*, Oxford University Press.
2. Lu J., Chen G., Ogorzalek M., Trajkovic L. (2013), "Theory and Applications of Complex Networks: Advances and Challenges", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 2291–2294.
3. Landi P., Minoarivelo O.H., Brännström Å., Hui C., Dieckmann U. (2018), "Complexity and stability of ecological networks: a review of the theory", *Population Ecology*, pp. 319–345.
4. Shortle J.F., Mark B.L., Gross D. (2009), "Reduction of closed queueing networks for efficient simulation", *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, Vol. 19, No. 3, Article 10.
5. MacKay R.S., Robinson J.D. (2018), "Aggregation of Markov flows I: Theory", *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*.
6. Liu J.X., Vorst N.V. (2012), "Realizing Large-Scale Interactive Network Simulation via Model Splitting", *Proceedings of the 26th Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS 2012)*, Zhangjiajie, China, pp. 3–12.
7. MacKay R.S. (2011), "Hierarchical aggregation of complex systems", *Proceedings of the ECCS'11*, Vienna, Austria.
8. Gorbachov V., Sytnikov D., Ryabov O., Batiia A. K., Ponomarenko O. (2020), "Dimension Reduction for Network Systems Using Structure Model Aggregation", *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol. 15, No. 1, pp. 13–23.
9. Mesarović M., Mako D., Takahara Y. (1977), *Theory of Hierarchical Multilevel Systems*, New York: Academic.
10. Gorbachov V., Batiia A. K., Ponomarenko O., Romanenkov Y. (2018), "Formal transformations of structural models of complex network systems", *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies DESSERT'2018*, Kyiv, Ukraine, pp. 473–477.
11. Cormen T., Leiserson C., Rivest R., Stein C. (2009), *Introduction to algorithms*, 3rd ed.
12. Ford L., Fulkerson D. (1956), "Maximal Flow Through a Network", *Canadian Journal of Mathematics*, 8, pp. 399–404.

Received (Надійшла) 11.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.03.2023

Aggregation of structural model of complex network systems

Olha Ponomarenko, Valeriy Gorbachov

Abstract. Complex systems require special methods of analysis and design. The main goal of these methods is to reduce the size of the system. It is necessary to find a simpler representation of such systems while preserving the properties of the system with initial dimension. In this paper formal transformations of structural model of the system using aggregation are reviewed. This approach leads to reduction of system dimension and computational complexity. **The subject of research** is the methods of structural model transformation of the systems. **The goal of this work** is to investigate the aggregation of structural model of systems which provides the reduction of system dimension, computational complexity and time of problem solving. **The relevance of this research** is that several problems can be solved at a higher level of the system hierarchy, which can be obtained as a result of structural model aggregation of the system. **The following tasks were solved** in the work: structural model transformations of the system and creation of the hierarchical system using aggregation; evaluation of the effectiveness of structural model transformation of the system by solving the maximum flow problem. **As a result of this research** a hierarchical system was created; the effectiveness of the method was demonstrated on the example of solving of the maximum flow problem. The results of evaluating the effectiveness of structural model transformations of the system: the number of elements of the system, the number of connections between elements of the system, and the number of graph traversal iterations are reduced; the value of the maximum flow is the same at two levels of the system. The studies allow us to **conclude** that the structural model transformation methods provide a simpler representation of complex systems while preserving the topological properties of the system at a higher level; as a result of the aggregation of the structural model, dimension of the system, computational complexity and time of problem solving are reduced; aggregation provides efficient ways to compute desired quantities for systems by reducing dimension of the system.

Keywords: structural model aggregation, structural model transformation, complex systems, system dimension reduction, maximum flow.

O. Skakalina, A. Kapiton

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

IDENTIFICATION AND MANAGEMENT OF RISKS IN THE PROJECT MANAGEMENT OF THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE PRODUCTS

Abstract. Software development is one of the most difficult areas of intellectual activity for forecasting and planning. By their nature, digital products are intangible, and software development projects often involve many stakeholders. Software development processes typically include several stages, including design, documentation, programming, and testing, all of which require a high level of professional, technological, and managerial knowledge. Due to the complex nature of digital projects, from the very beginning of the implementation of any software project, it is necessary to take into account and manage a wide range of risks, which are one of the most important factors affecting the success of a digital project. The work analyzes and classifies project risks, conducts a qualitative and quantitative identification of the main risks for the selected subject area, the Crawford card method was used to work with project risks, the risks were ranked, a responsibility matrix for the project was created, the workload of the project resources was analyzed, and the project was optimized.

Keywords: risks, project management, optimization, identification, Risky Project.

Introduction

Software development risks are factors that can affect the success of a digital project. They can arise both internally (when they are the result of situations within the company) and externally (when they are influenced from outside). There is also the issue of personal risks associated with the efforts and professional qualities of individual team members. There are many reasons why identifying software development risks has become so important. A software development risk management plan helps the team evaluate the entire project, plan for success, maximize results, meet deadlines, communicate effectively with stakeholders, and finally allocate funds to eliminate significant risks.

Risk is always a potential problem. In software development, a risk is any event that can jeopardize the success of a digital project. Relying on guesswork and crisis management is an ineffective approach. To properly manage and mitigate risk, you should always have a risk management plan in place. Proper implementation of such a plan can help you prevent the impact of risks if and when they arise, while at the same time improving the quality of your digital product. Even if every project comes with numerous software development risks, most of them can be prevented before they cause any damage.

Analysis of recent research and publications. Risk is the possibility of occurrence of any adverse situations and negative consequences in the future. The concept of "risk" is closely related to the concepts of "probability" and "uncertainty".

Risk management is a field of modern management related to the specific activities of managers in conditions of uncertainty, complex selection of options for management actions. Risk management can be defined as a system of making and implementing management decisions aimed at reducing the impact of the consequences of the implementation of risks on the organization's activities [1]. Planning and implementation of projects takes place in conditions of uncertainty caused by changes in internal and external

environments. Uncertainty is understood as the lack of complete and reliable information about the conditions of project implementation. Uncertainty associated with the possibility of adverse conditions, situations and consequences occurring during project implementation is called risk [2]. In a market economy, risk is an integral attribute of business. Uncertainty makes it impossible to avoid risk. But this does not mean that you should look for such solutions in which the result is known in advance, they are usually ineffective. It is necessary to learn to predict risk, assess its size, plan measures to prevent it. Risk is a complex economic and management category, in the definition of which there are a number of contradictions [3].

Risk management is the process of responding to events and changes in risks during project implementation.

At the same time, risk monitoring is important. Risk monitoring includes risk control throughout the entire project life cycle. Quality risk monitoring provides information management that helps make effective decisions before risk events occur.

The most widespread characteristic of risk is the threat or danger of failure in one or another activity, the danger of adverse consequences, changes in the external environment that can cause loss of resources, damages, as well as the danger against which it is necessary to insure. Therefore, project risk is a combination of constraints and uncertainty. It is possible to minimize the risk in the project by either eliminating constraints (which is quite problematic), or finding and reducing uncertainty [4].

Risks arise at different stages of the life cycle of an innovative project (Table 1). From the point of view of project management in the software development life cycle, risk management is the process of identifying risks, evaluating them and limiting or mitigating those that may hinder the achievement of the overall goal, while at the same time, maximizing opportunities and results. In the case of the risk management process in software development, it is about managing the risks that prevent the successful release of a well-tested and secure digital product.

Table 1 – Types of risks arising at different stages of the project life cycle

Phase	Types of risks
<i>Pre-investment</i>	Mistakes in the development of the project concept Incorrect determination of project location Attitude towards the local government project Making a decision about the feasibility of investing
<i>Investment</i>	Solvency of the customer Unforeseen expenses for construction work Exceeding construction terms, equipment costs Untimely supply of equipment Non-fulfillment of contractual obligations by contractors Untimely training of personnel
<i>Operational</i>	Emergence of an alternative product (service) Insolvency of consumers The scope and segment of the market in which the project product is implemented are incorrectly defined Change in prices for raw materials, transportation; salary Changes in the cost of capital and the level of inflation Threat to environmental safety Change in the population's attitude towards the implementation of the project

Practical implementation of the risk management process in the direction of software engineering, specific responsibility of the executors - the role of risk manager is performed by project managers or product owners. They are responsible for identifying risks in software project management, monitoring the project and making sure everything is going according to the project parameters.

In other words, they identify business risk factors, assess their probability and impact on the project, make a plan and carry out risk management. This is risk identification, risk analysis and risk mitigation in an optimal presentation.

Statement of the research problem. The following risk management algorithm is applied in the work, which consists of 5 stages in accordance with the features of the subject area - software engineering.

• *Stage I - identification of risks*

The first thing we do is identify potential problems and threats that could potentially affect the project. We then calculate their chances of showing up - a risk score. To do this, we can use various risk management tools and techniques, as well as general risk knowledge from previous projects and experience from other teams. How likely are these software risks to occur?

• *II stage - risk analysis*

At this stage, we assess the impact of a specific risk on the product. How serious is it? Thanks to this, we can prepare the right course of action and make business decisions related to reducing risks.

• *Stage III - setting priorities*

When we know what we're dealing with, what might cause a problem, and the breadth and depth of a particular business operation, we can rank risks based on their urgency and the damage they can cause.

• *Stage IV - responding appropriately*

We have identified threats to the software development process, analyzed them and prioritized

them. Now is the time to act. This step depends on whether we can prevent the risk or reduce it as much as possible. Depending on the type of threat, we take appropriate action.

• *Stage V – monitoring*

When the project plan is executed, we observe the changes – did the selected strategy work? If not, we make the necessary changes and try again. There is no end to risk management – therefore, it is necessary to constantly monitor project risks.

Risk management must begin with a thorough analysis of the client's business and the client's end-user needs. In addition, market and competitor business analysis helps to identify and mitigate certain risks associated with launching the program at an early stage, resulting in reduced risks. Depending on the results of the research and whether the product is innovative, it is suggested to perform a concept test of the project goal to check if the idea is feasible and to avoid the risk of low demand for the digital product.

Later, as the process continues, internal and external tests must be conducted. With these tests, we can eliminate the risk that the application will not be intuitive or will not have the necessary functions. In addition, the developer receives regular feedback about the project and information about threats and challenges that arose during the implementation of the project.

Basic material and results

The choice of the method of risk reduction is carried out as a result of comparing the necessary means to reduce risks with the benefits of preventing loss.

This ratio is determined using the risk factor.

$$Kp = Y / C,$$

where Kp is the risk factor; Y – the maximum possible amount of damage; C is the amount of own resources, taking into account precisely known inflows of funds [5].

The optimal risk factor is 0.3.

The effectiveness of measures to reduce risks is determined using the following algorithm:

1) the most significant risk for the project is considered;

2) the overspending of funds is determined taking into account the probability of the occurrence of adverse events;

3) a list of possible measures aimed at reducing the probability and danger of a risk event is determined;

4) additional costs for the implementation of the proposed measures are determined;

5) the necessary costs for the implementation of the proposed measures are compared with the possible overspending of funds due to the occurrence of a risky event;

6) a decision is made to implement or refuse anti-risk measures;

7) the process of comparing the probability and consequences of risk events with the costs of measures to reduce them is repeated for the next most important risk.

The subject area "*E-commerce Management*" was defined for the management of the developed digital project.

Modern technologies transfer direct marketing to new electronic spheres of activity. The term "electronic commerce" (e-commerce) unites a wide range of business activities carried out through electronic data exchange; using the Internet, telefax and e-mail for transactions, which speed up and facilitate ATM and start card calculations. All this brings business activity from "market as place" to "market as space". Although the growth rate of Internet purchases of goods (computers, software, books, CDs, video materials, video games) is constantly increasing, the volume of business transactions is increasing even faster [6].

A method using Crawford cards was chosen for qualitative and quantitative risk analysis of the selected subject area.

The method was developed by Dr. C.C. Crawford to quickly collect the opinions of a large number of people in a short period of time, and anonymously if the participants so desired. The surveyed group is asked a question. Participants must formulate their ideas and write each one down on a separate sheet - this is a mandatory rule. At the same time, there should be no exchange of opinions in order to exclude the influencing factor. Thus, the organizer will have at his disposal a fairly large number of cards with answers, from which a list is made and sent to the participants for making changes and additions [7].

The method of Crawford cards involves the following procedure:

– Each participant writes down each idea on a separate card.

– All submitted ideas are then copied on a large stand and briefly discussed. The purpose of the discussion is to find out the essence of each idea and exclude repeated ideas from consideration.

– The next step is individual work, when participants rank the proposed ideas. From the general list of ideas, each member of the group chooses no more than five ideas and writes them down on his card for ranking. When ranking ideas, participants assign numerical coefficients to these ideas, starting with 5 for the most important idea and ending with 1 for the least important.

– The organizer collects all cards with rankings and rewrites the coefficients assigned to the ideas on the poster. For each idea, the weights are summed. The overall score is also recorded on the stand. If the idea gained the most weight, then it is considered the most priority idea of the group and is adopted as a decision.

Therefore, we will form a list of risks for the project to develop a digital project for creating a computer game and its implementation by means of e-commerce:

1. Undemanding and unattractive game concept.
2. Technical implementation.
3. Violation of copyright.
4. Risk of information security.
5. Lack of qualified personnel.
6. Lack of vision of the final goal of the development.

After forming the list of risks, we will clarify them in the Table 2.

Table 2 – Determining the risks of the "Computer game development" project

Reason	Conditions	Consequent	Damages
Undemanding and unattractive game concept.	Poor analysis of focus groups and lack of contact with the audience.	Few copies of the game were sold.	Low or no profit from game sales.
Technical implementation.	Insufficient supply of technical resources.	Emergence of bugs and low optimization of the product.	User dissatisfaction and loss of trust.
Copyright infringement.	Excessive borrowing of ideas from analogues.	Legal proceedings with the analog developer.	Loss of time and money for legal proceedings and payment of compensation and loss of reputation in case of loss.
Risk of information security.	Insufficient security of the product against hacking.	Leakage of product and user information.	Disclosure of corporate secrets, possible financial losses and loss of reputation.
Lack of qualified personnel.	Work with software and technical support for which the necessary specialists are not available.	Low development productivity.	An increase in terms and complexity of development.
Lack of vision of the final goal of the development.	The development team does not agree on what the game should be.	Exceeding the game's release schedule.	Loss of audience interest due to postponement of release and loss of investor confidence.

Qualitative risk analysis includes ranking of identified risks. When analyzing the probability and impact, it is assumed that no risk prevention measures are taken. Qualitative risk analysis includes [8]:

- ✓ Determination of the probability of realization of risks.
- ✓ Determination of the severity of the consequences of the realization of risks.
- ✓ Determination of the risk rank according to the "probability - consequences" matrix.
- ✓ Determining the proximity of the risk.

✓ Assessment of the quality of the information used.

For a qualitative assessment of the probability of risk realization and determination of the severity of the consequences of its realization, as a rule, scales generally accepted in the organization are used, examples of which are given in Table 3, 4. To determine the risk rank, a matrix of probabilities and consequences is used (Fig. 1). The risk rank is determined by the product of the weight of the probability and the significance of the consequences.

Table 3 – Risk impact assessment scale

Weight	Value	Criterion
3	Catastrophic	Losses over \$100K
2	Critical	Losses from \$10K to \$100K
1	Moderately	Losses less than \$10K

Table 4 – Scale for assessing the probability of risk realization

Weight	Value	Criterion
3	Very likely	The chances of occurrence are quite high
2	Perhaps	The chances are equal
1	Not likely	The occurrence of the event is very doubtful

For the identified risks, we will choose risk response strategies:

1. Shortage of qualified personnel (grade 9) - *risk reduction*. Strengthen the quality of recruitment of employees, provide them with proper training and provide appropriate working conditions for retention.
2. The lack of demand and unattractiveness of the

game concept (grade 6) - *risk reduction*. Maximize the audience, for example, due to the simplicity of the game and taking into account the wishes of the players, and maximize the probability of a viral reaction (many indicators, including such as exchanging items, using friends as resources for personal play).

3. Technical implementation (grade 6) – *risk transfer*. To conclude a contract with the game publisher for the proper provision of technical and software equipment and the transfer of all responsibility for the provision of service and maintenance.

4. Lack of vision of the final goal of development (grade 6) - *risk avoidance*. Adding to the project plan meetings and meetings to discuss the stages of project development and agree on goals.

5. Information security risk (grade 2) – *risk reduction*. Take measures to ensure the protection of information and provide the maximum possible protection against hacking by hackers.

6. Infringement of copyright (grade 2) - *acceptance of risk*. It is difficult to follow all competitors, and if someone has claims, it will be difficult to prove the fact of plagiarism in court.



Fig. 1. Risk ranking and matrix of probabilities and consequences

The criteria for assessing the quality of the information used in the analysis are as follows:

- Degree of risk understanding.
- Availability and completeness of risk information.
- Reliability, integrity and reliability of data sources.

The result of qualitative risk analysis is their detailed description in risk cards:

- The first card "*Shortage of qualified personnel*"
- The second card "*Undemanding and unattractive game concept*"
- The third card "*Technical implementation*"
- The fourth card "*Lack of vision of the final development goal*"
- The fifth card "*Information security risk*"
- The sixth card "*Copyright infringement*"

A matrix of responsibility for the project was created (Table 5).

At the risk management stage of the project, three versions of the digital project were calculated for the determination of risks using the Monte Carlo method: optimistic (initial project completion period), expected (performance period multiplied by a factor of 1.3) and

pessimistic (performance period multiplied by a factor of 1.5). After calculating the terms, we will get risk forecasts using the "RiskyProject 7" program (Fig. 2).

Table5 – Project responsibility matrix

Working	executant		
	#1	#2	#3
Determining the purpose of the project	✓	✓	✓
Planning project stages	✓		
Creating tasks for project stages	✓		
Establishing deadlines and dates for tasks	✓		
Establishing a sequence of tasks	✓		
Identification of required types of resources			✓
Creating a resource pool		✓	✓
Assigning the cost of resources			✓
Assignment of resources to the task			✓
Analysis of the causes of resource overload		✓	✓
Leveling of overloaded resources		✓	
Duration optimization	✓	✓	
Cost optimization	✓	✓	
Виявлення ризиків	✓	✓	
Аналіз та оцінка ризиків	✓	✓	✓

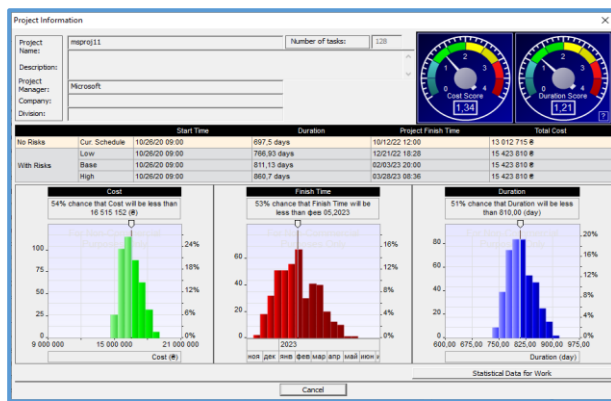


Fig. 2. Risk forecasts for the project

According to the results of risk modeling, it can be seen that with optimistic forecasts, the probability that the duration of the project will be 766.93 days, with the expected result, the duration of the project will be 811.13 days, and with pessimistic forecasts, the duration will be 860.7 days, which will be 1.21 more than the planned duration.

The projected cost of the project in all three versions of the forecast will amount to UAH 15,423,810, which will be 1.34 times more than the planned cost.

It is also predicted that with a 54% probability the cost of the project will be less than UAH 16,515,152.

There is a 53% probability that the end of the project will come earlier than 02/05/2023. There is a 51% chance that the project duration will be less than 810 days.

Conclusions

Risk management is an important component of digital project planning. Risk management in software engineering involves the identification and assessment of the probability of risks in the order of their impact on the project. Software development is a high-level activity that uses a wide range of technological advances. Every software development project contains elements of uncertainty due to these and other factors. The level of risk associated with each project activity determines the success of a software development project.

It is not enough to simply be aware of the danger. To be successful, project management must identify, assess, prioritize, and manage all major risks.

Most software engineering and software development projects strive to be unique, whether they are creating new features or improving the efficiency of existing digital projects.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) Seventh Edition and The Standard for Project Management. 2021
2. Skakalina E. V. (2021). IMPLEMENTATION OF RISC PROJECT MANAGEMENT METHODOLOGY WHEN DEVELOPING A MOBILE APPLICATION FOR HEALTH CONTROL OF PATIENTS WITH DIABETES MELLITUS. Intellectual capital is the foundation of innovative development: engineering, computer science, safety, transport, physics and mathematics, biology and ecology, agriculture. Monographic series «European Science». Book 6. Part 4. 2021. Chapter 3. Karlsruhe, Germany.
3. Скакаліна О.В. Управління ризиками засобами ERP – систем // VI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та взаємодії» IT&T – 2019 (20 грудня 2019 року) / Матеріали доповідей. – Київ: МОН України, 2019. – С.84-87.
4. Проектні ризики і невизначеність –<https://4brain.ru/project/vipolnenie.php>
5. Erik Bethke. Game Development and Production. Texas: Wordware Publishing, Inc, 2013. 437 с.
6. Integrated Risk Management (IRM). *gartner.com*: веб-сайт. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/integrated-risk-management-irm> (дата звернення: 16.10.2022).
7. Sytnyk, V.A., Bulashov, V.V. Methodology for managing the development of it projects with open source/ 5th International conference on Eurasian scientific development in 2018: new methods and solutions». Proceedings of the Conference (September 02, 2018). Premier Publishing s.r.o. Vienna. 2018.46 p. ISBN-13 978-3-903197-73-2
8. Barska, I. Algorithm of Distributing the Team Load for IT-Project / Barska I., Teslenko P., Fesenko T., Voznyi O. // Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). — Warsaw: University of Technology, 2015. — p. 559 – 562.

Received (Надійшла) 26.10.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.01.2023

Ідентифікація і керування ризиками при проектному управлінні розробкою програмних продуктів

О. В. Скакаліна, А. М. Капітон

Анотація. Розробка програмного забезпечення є однією з найскладніших сфер інтелектуальної діяльності для прогнозування та планування. За своєю природою цифрові продукти є нематеріальними, а проекти розробки програмного забезпечення часто включають багато зацікавлених сторін. Процеси розробки програмного забезпечення зазвичай включають кілька етапів, включаючи проектування, документацію, програмування та тестування, усі з яких вимагають високого рівня професійних, технологічних та управлінських знань. Через складну природу цифрових проектів, з самого початку впровадження будь-якого програмного проекту необхідно враховувати та управляти широким спектром ризиків, які є одними з найважливіших факторів, що впливають на успіх цифрового демонструвати. У роботі аналізується та класифікується ризики проекту, проводиться якісна та кількісна ідентифікація основних ризиків для обраної предметної області, для роботи з ризиками проекту використано метод карт Кроуфорда, ранжовано ризики, створено матрицю відповідальності за проект, проаналізовано завантаженість ресурсів проекту та оптимізовано проект.

Ключові слова: ризики, управління проектами, оптимізація, ідентифікація, Risky Project.

Т. В. Філімончук, Ю. М. Колтун, І. М. Климова, Д. Ю. Корнієнко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ПУЛУ ЗАВДАНЬ ЗА ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ

Анотація. Актуальність. На даний час існує проблема, яка пов'язана з відсутністю алгоритмів оптимального управління розподілом пулу завдань, який надходить на обчислювальні ресурси кластеру. Планувальники, які здійснюють розподіл завдань, не враховують вартість використання обчислювальних ресурсів, які можуть зменшити час виконання пулу завдань. Завдання, які надходять на вхід планувальника, є різнорідними, що також створює додаткові складнощі під час їх розподілу. **Метою даної роботи** є модифікація моделі розподілу пулу завдань з урахуванням критеріїв розподілу, розробка методу пошуку оптимального плану розподілу та впровадження його в імітаційне середовище GRASS. **Об'єктом дослідження** є процес розподілу пулу завдань на обчислювальні ресурси кластеру. **Предметом дослідження** є методи та алгоритми моделювання розподілу пулу завдань. **Результати.** Запропонована модифікація моделі розподілу завдань на обчислювальні ресурси кластеру, за рахунок використання критеріїв розподілу. Критерії реалізовано в якості модуля, який додано до середовища імітаційного моделювання GRASS. На основі математичної моделі запропонован метод пошуку оптимального плану розподілу завдань по обчислювальним ресурсам кластеру. **Висновок.** Критерії розподілу, які додано до моделі розподілу пулу завдань, є складовою методу пошуку оптимального розподілу. Завдяки використанню їх комбінацій здійснюється пошук розподілу, який задовольняє вимогам постачальників завдань та ресурсів.

Ключові слова: модель розподілу завдань, імітаційне середовище, критерії розподілу, метод пошуку оптимального плану.

Вступ

На даний час існує низка методів та алгоритмів, які орієнтовано на розподіл завдань по обчислювальним ресурсам, що виділяються для запуску ресурсомістких завдань [1-5].

Розподіл завдань – це важлива та суттєва проблема при роботі з різнорідними завданнями та обчислювальними ресурсами. Багато дослідників намагаються передбачити оптимальне рішення для планування запуску завдань на ресурсах кластеру. Але розподіл завдань – це, як правило, NP-повна задача, що додає додаткові труднощі при розподілі, тому що існує багато критеріїв, які впливають на розподіл в цілому. Як правило для вирішення NP-повної задачі використовують евристичні алгоритми оптимізації [6, 7], крім того застосовують еволюційні алгоритми [8, 9] для передбачення оптимального рішення задачі за відповідний час.

Величезна ніша у питанні планування розподілу відводиться програмам, які саме і здійснюють розподіл завдань між існуючим пулом обчислювальних ресурсів. Ці програми отримали назву – планувальники завдань, і їх основна ціль – побудувати план розподілу, що відповідає вимогам, які заявлені постачальниками завдань та обчислювальних ресурсів.

При побудові плану розподілу здійснюється оптимізація значень параметрів цільової функції [10, 11], за рахунок яких відбувається скорочення часу виконання завдань, що в свою чергу призводить до ефективного використання обчислювальних ресурсів кластеру. Відомі планувальники мають ряд недоліків, головним з яких є орієнтація на конкретний клас задач. Сучасні планувальники, як правило, при розподілі використовують один найпростіший метод розподілу та не приймають до уваги ціну використання обчислювального ресурсу, що в свою чергу призводить до неефективного використання ресурсів кластеру.

Метою роботи є модифікація існуючої моделі розподілу завдань на обчислювальні ресурси кластеру, розробка та впровадження в імітаційне середовище методу пошуку оптимального розподілу для пулу завдань, що надходять на обчислювальні ресурси кластеру з урахуванням критеріїв розподілу.

Основна частина

Виділення обчислювальних ресурсів для запуску завдань – це один із основних типів управління у кластері, тому що розподіл окремих ресурсів, впливає на вартість та продуктивність використання усього кластеру [12-15]. Основна мета розподілу полягає в найкращому використанні ресурсів інфраструктури, інтегруванні їх для досягнення більшої пропускної спроможності при вирішенні великомасштабних обчислень.

На даний час існує дерілька представлень моделей [16, 17] розподілу завдань на обчислювальні ресурси. Більш детально зупинемося на моделі [18], яка будується на трьох множинах: множині обчислювальних ресурсів R , множині завдань Z та множині методів Q , тобто

$$G = \{R, Z, Q\}. \quad (1)$$

Всі ресурси кластеру згруповано у єдиний пул ресурсів $\{R_j, j = 1, 2, \dots, N\}$, $\forall j = 1..N$, де j – номер обчислювального ресурсу, а N – число ресурсів в кластері. Кожний ресурс кластеру описується за допомогою кортежу за відповідними правилами

$$R_j = \{ar_j^r, os_j^r, pc_j^r, ps_j^r, ms_j^r, dc_j^r, bw_j^r, d_j^r\}, \quad (2)$$

де ar_j – архітектура процесора; os_j – операційна система; pc_j – кількість процесорів; ps_j – швидкодія процесорів; ms_j – об'єм оперативної пам'яті; dc_j – доступний обсяг вінчестера; bw_j – сумарна пропускна здатність каналу (від брокера до ресурсу) з урахуванням стану мережі на поточний час; d_j – су-

марна затримка часу передачі пакета з урахуванням стану мережі на поточний час.

Завдання, які надходять на кластер – це пакет задач, що згруповано за певною ознакою. Кожне завдання містить інформацію про характеристики необхідних обчислювальних ресурсів, вхідні та вихідні набори даних, а також інші відомості. Завдання як і ресурси згруповано у пул $\{Z_i, i = 1, 2, \dots, M\}$, де i – номер завдання, а M – число завданні у пулі. Як і ресурси кластеру, завдання, що надходять на його вхід формуються за відповідними правилами

$$Z_i = \{ar_i^z, os_i^z, pc_i^z, ps_i^z, ms_i^z, dc_i^z, pr_i^z, ca_i^z, rt_i^z\}, \quad (3)$$

де pr_i – пріоритет завдання; ca_i – коефіцієнт зв'язності задач у завданні; rt_i – час виконання завдання.

Розподілом завдань на обчислювальні ресурси займається планувальник, який виступає посередником між постачальниками завдань та обчислювальних ресурсів. Він реалізується за допомогою певного методу розподілу. На даний час існує низка систем управління й розподілу ресурсів, проте планувальники, які реалізовані в них, не дають ефективного способу розподілу завдань, з їх допомогою користувач може лише скористатися одним простим алгоритмом.

Методи планування, які використовуються в існуючих керуючих системах, мають ряд недоліків. Перш за все, вони не в змозі забезпечити високу обчислювальну завантаженість вузлів кластера. Також часто виникає ситуація, коли є вільні обчислювальні вузли, в той час як в черзі чекає свого виконання досить велика кількість завдань. Більш того, вони не завжди розглядають випадок, коли обчислювальні вузли мають неоднорідний склад, тобто коли вони відрізняються обсягами оперативної та дискової пам'яті, продуктивністю процесорів. Також не у всіх керуючих системах враховується можливість наявності локального завантаження вузлів, яка характерна для кластерів робочих станцій.

Імітаційне середовища моделювання GRASS [18,19] дозволяє проводити низку експериментів з

використанням декількох методів розподілу $Q_k = \{mn_k, lp_k\}$, $\forall k = 1..K$, де mn – метод розподілу завдань по обчислювальним ресурсам, lp – вихідні параметри, які враховуються при розподілі для відповідного методу. Використання існуючої моделі розподілу завдань та середовища імітаційного моделювання GRASS дозволяє сформувати плани розподілу по кожному із методів розподілу, і в подальшому, отримавши результати, можливо зробити аналіз та висновок, який із методів розподілу надає оптимальний (найкращий) результат. Наприклад, за загальним часом виконання пулу завдань, який надійшов на вхід кластеру.

Але висновок на основі одного параметру не надає повної картини використання ресурсів обчислювального кластеру. Тому при здійсненні розподілу слід враховувати не тільки «виграш» постачальника завдань, а й «продуктивність використання кластеру» постачальника ресурсів. Тому рекомендується додати до моделі розподілу завдань ряд показників, які будуть впливати на процес пошуку оптимального розподілу, а саме множину критеріїв розподілу

$$Cr = \{t_r, t_{av}, p_d\}, \quad (4)$$

де t_r – загальний час виконання пулу завдань; t_{av} – середній час очікування завдань в черзі; p_d – відсоток простою обчислювальних ресурсів кластеру.

Наведені критерії розподілу дозволять здійснювати оптимізацію відповідно за бажанням постачальників завдань та ресурсів (можливо використовувати ці критерії окремо один від одного або обирати різноманітні комбінації).

Після того, як до моделі розподілу додано критерії розподілу вона приймає вигляд

$$G = \{R, Z, Q, Cr\}. \quad (5)$$

На підставі того, що в моделі розподілу завдань з'явилася додаткова множина до середовища імітаційного моделювання GRASS було додано модуль, який реалізує метод пошуку оптимального плану розподілу. На рис. 1 наведено його місто в імітаційному середовищі GRASS.

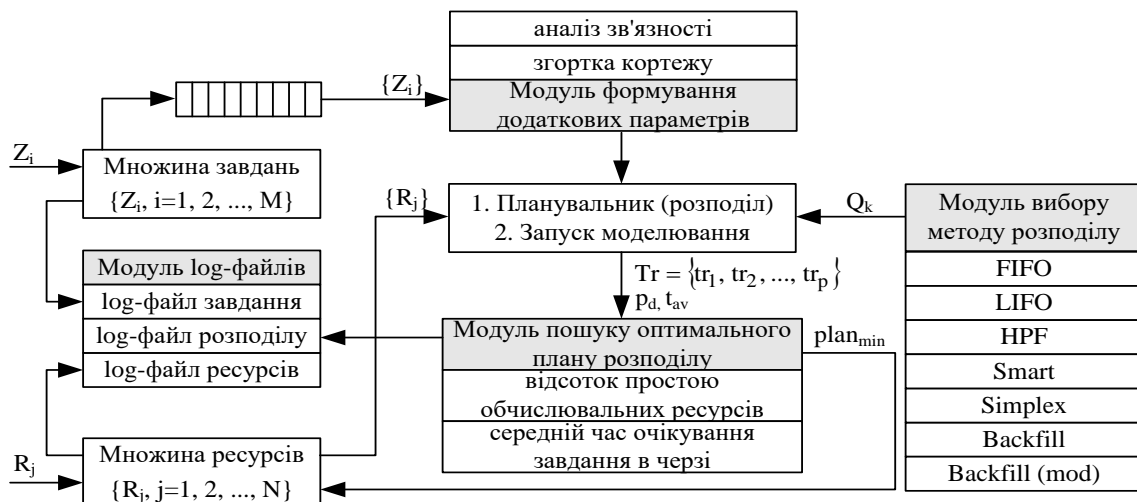


Рис. 1. Місто модулю пошуку найкращого плану розподілу в імітаційному середовищі GRASS

Завдання, що надходять на вхід середовища моделювання, утворюють потік $\{Z_i\}$. Кожне завдання має дві складові: характеристики завдання (вимоги до обчислювальних ресурсів) та тіло завдання (у вигляді .exe-файлу, файли вхідних даних, БД тощо). На початковому етапі розподілу головне значення мають вимоги до ресурсів.

Паралельно із завданнями до середовища моделювання GRASS надходить інформація про доступні обчислювальні ресурси $\{R_j\}$.

Модуль вибору методів розподілу завдань містить ряд методів $\{Q_k\}$, кожен з яких використовує свій набір параметрів для розподілу (перед запуском експерименту можливий вибір різного числа методів розподілу). Всі завдання, що надійшли до системи, поміщаються в чергу завдань і паралельно відбувається передача інформації по кожному завданню в модуль формування додаткових параметрів, де в подальшому буде здійснена згортка кортежу та аналіз задач у завданні на зв'язність.

При згортанні кортежу здійснюється обчислення узагальненого критерію оцінки по кожному завданню. Таке обчислення дозволяє більш ефективно керувати процесом розподілу завдань на обчислювальні ресурси та показує, яку частину обчислювального ресурсу займає завдання в процесі його виконання [10]. На виході цього підмодуля є множина обчислювальних ресурсів, на які завдання може бути розподілено.

Наступним шагом є аналіз зв'язності задач в завданні. Якщо задачі в завданні мають високу зв'язність або для даного завдання необхідне пересилання великого обсягу даних, відбудеться підбір обчислювальних ресурсів таким чином, щоб зменшити час передачі даних між задачами в завданні (тобто їх слід розташувати поруч).

Якщо в системі присутні обчислювальні ресурси для запуску такого завдання, але вони на даний момент зайняті, то завдання залишиться в черзі та набуде стану Waiting. Коли необхідні ресурси будуть звільнено, завдання буде направлено для виконання на обрані обчислювальні ресурси кластеру. Якщо таких ресурсів на кластері не виявиться, то завдання набуде стану Cancelled, після чого його буде видалено з черги, з інформуванням постачальника про неможливість його виконати ресурсами даного кластеру [20]. У даному випадку у постачальника завдань є можливість змінити вимоги для запуску завдання ще раз. Використання інформації, що передається з підмодуля аналізу зв'язності, дозволяє здійснювати підбір обчислювальних ресурсів на кластері з урахуванням зменшення часу на передачу вхідних та вихідних даних для завдання. Планувальнику для розподілу завдань на обчислювальні ресурси кластеру необхідно отримати такі дані:

- інформацію про обчислювальні ресурси, які присутні в системі;
- інформацію про обчислювальні ресурси, що є задіяними та час їх вивільнення;
- метод розподілу;
- інформацію про зв'язність задач в завданні.

На основі отриманих даних планувальник розподіляє завдання на обчислювальні ресурси кластеру. Результатом роботи планувальника є множина планів розподілу за обраними заздалегідь методами розподілу.

Далі отримані плани розподілу запускаються в середовище моделювання з метою отримання результатів моделювання, які в подальшому будуть проаналізовані та буде обраний оптимальний план розподілу. В результаті роботи імітаційного середовища з'являється множина часів виконання пулу завдань t_r за кожним методом розподілу, а також значення критеріїв, які також вираховуються для кожного методу (t_{av} та p_d).

Наступний крок, це робота методу пошуку оптимального рішення. Робота цього методу полягає в аналізі отриманих планів розподілу з урахуванням критеріїв розподілу, які було задано постачальниками. Ці дані (вагові коефіцієнти) постачальники завдань вносять до імітаційного середовища. Те ж саме стосується і постачальників ресурсів в момент надання ресурсів для використання. Вагові коефіцієнти необхідні для розрахунку критерію оцінки розподілу та подальшого аналізу плану розподілу.

Етап 1: завантаження вихідних даних:

- множини часів виконання планів $Tr = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_p\}$, $\forall p = 1..P$ по кожному методу розподілу ($mn \in Q$) $f : Plan_k \rightarrow Tr_k$;

- відсотку простою ресурсів кластеру p_d по кожному із обраних методів розподілу;

- середнього часу очікування завдання в черзі t_{av} по кожному із обраних методів розподілу.

Етап 2: отримання результатів аналізу планів на підставі параметрів часткових критеріїв: t_r , t_{av} та p_d . Якщо отримані критерії використовувати в комбінації, то їх спочатку слід об'єднати в узагальнений (адитивний) критерій [10]. Після цього можливо здійснювати подальший аналіз.

На виході модулю пошуку оптимального плану розподілу формується рекомендаційна інформація щодо кожного плану розподілу, яка пересилається постачальникам завдань та ресурсів з відповідними розрахунками та рекомендаціями.

Будь-яке завдання, яке надійшло до середовища моделювання, буде розподілено. Винятком може бути випадок, коли в системі не виявиться необхідних обчислювальних ресурсів. У цьому разі завдання буде відмовлено у виконанні, і воно будуть відправлено постачальнику для зміни вимог. Процес моделювання по кожному методу розподілу триває до тих пір, поки в черзі присутні завдання.

Метод рішення багатокритеріальних задач оптимізації з використанням узагальненого (інтегрального) критерію заснований на об'єднанні приватних критеріїв $F_i(X)$, $i = \overline{1, n}$ в один інтегрований $F(X) = \Phi(F_1(X), F_2(X), \dots, F_n(X))$ з подальшим знаходженням максимуму або мінімуму даного критерію [10].

При використанні адитивного критерію цільова функція у загальному вигляді має такий вигляд:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n C_i \frac{F_i(X)}{F_i^0(X)} = \sum_{i=1}^n C_i f_i(X) \rightarrow \max(\min), \quad (6)$$

де n – кількість приватних критеріїв, що об'єднуються; C_i – ваговий коефіцієнт i -го приватного критерію; $F_i(X)$ – числове значення i -го приватного критерію; $F_i^0(X)$ – i -й дільник, що нормує; $f_i(X)$ – нормоване значення i -го приватного критерію.

В якості дільників, що нормують, приймаються директивні значення параметрів або критеріїв, які

Таблиця 1 – Результати експериментів

Критерій F_i	Ваговий коефіцієнт C_i	Значення критеріїв по методам розподілу						
		FCFS	LIFO	HPF	Backfill	Backfill_mod	Simplex	Smart
t_r	0,4	10:48:55	10:52:48	10:48:37	9:36:43	8:36:56	9:12:11	9:05:54
t_{av}	0,3	3:22:32	4:58:24	2:52:48	2:35:59	2:07:44	1:55:54	2:01:37
p_d	0,3	85	79	75	63	51	53	50
Результати для пошуку найкращого плану розподілу								
t_r, p_d		1,01213	0,97913	0,9519	0,8243	0,706	0,7453	0,7224
p_d, t_{av}		1,03425	1,24639	0,89728	0,7818	0,63662	0,618	0,6148
t_r, t_{av}		1,02637	1,27752	0,94918	0,85	0,73062	0,7273	0,7372
t_r, p_d, t_{av}		1,53637	1,75152	1,39918	1,228	1,03663	1,0453	1,0372

З табл. 1 видно, що в залежності від того, який критерій розподілу обрано – змінюється результат вибору плану розподілу:

- якщо головним критерієм оптимізації обрати $t_r \rightarrow \min$, слід обирати метод розподілу Backfill_mod, тому що за допомогою цього методу пул завдань виконається за 8:36:56;

- якщо в якості головного критерію оптимізації обрати $t_{av} \rightarrow \min$ – слід обрати метод розподілу Simplex, який говорить, що середній час очікування завдання в черзі складає 1:55:54;

- якщо головним критерієм оптимізації обрати $p_d \rightarrow \min$, то слід розподіляти завдання за допомогою методу розподілу Smart. Він дає найкращий результат простою обчислювальних ресурсів – 50%.

Інша картина випливає в тому випадку, коли використовувати комбінації критеріїв розподілу (t_r, t_{av}, p_d).

Якщо в якості критеріїв розподілу використовувати $\{t_r, p_d\} \rightarrow \min$, то розподіляти завдання краще за допомогою методу розподілу Backfill_mod, а якщо використовувати комбінації критеріїв $\{t_r, t_{av}\} \rightarrow \min$, то в якості методу розподілу слід обирати метод розподілу Smart.

В тому випадку, коли в якості критеріїв обрано $\{t_r, t_{av}\} \rightarrow \min$, то слід обирати метод Simplex. А ось коли обираємо $\{t_r, p_d, t_{av}\} \rightarrow \min$, то слід обирати метод Backfill_mod.

Всі результати отримано завдяки розрахункам, які стосуються конкретних пулів завдань та обчислювальних ресурсів. Але якщо обрати інші пули завдань та ресурсів для моделювання, а також інші

було задано постачальниками або максимальні (мінімальні) значення критеріїв, що досягаються в області допустимих рішень. Узагальнений адитивний критерій, який отримується в результаті розрахунків є безрозмірною величиною.

Перед початком моделювання було задано наступні вагові коефіцієнти для приватних параметрів $t_r = 0.4$, $p_d = 0.3$, $t_{av} = 0.3$, а також завантажено пули завдань та обчислювальних ресурсів кластеру.

Використовуючи набір методів розподілу, які були присутні в імітаційному середовищі GRASS (FCFS, LIFO, HPF, Backfill, Backfill_mod, Simplex та Smart), проведено імітаційне моделювання та отримані відповідні результати (табл. 1).

вагові коефіцієнти, то результати пошуку найкращого методу розподілу будуть інші.

Висновки

В результаті проведених авторами досліджень було модифіковано математичну модель розподілу завдань за рахунок введення до неї критеріїв розподілу, які допомагають обрати оптимальний план розподілу для відповідних пулів завдань та обчислювальних ресурсів кластеру. Запропоновані критерії реалізовано в якості модуля і додано до середовища імітаційного моделювання GRASS. Критерії розподілу є складовою методу пошуку оптимального рішення і відповідно до обрання їх комбінацій здійснюється пошук розподілу, який задовольняє вимогам постачальників завдань та ресурсів.

В ході дослідження було здійснено ряд експериментів. Під час їх проведення отримана залежність результатів розподілу від класу завдань, які надходять на кластер. Результати доводять те що, застосування одного методу розподілу завдань в планувальнику є менш ефективним ніж множини. Більш ефективним варіантом є вибір оптимального плану розподілу за допомогою запропонованого методу пошуку оптимального розподілу завдань з множини методів розподілу, тому що завдання, які надходять на кластер є різномірними. В даний час не існує методу розподілу, який для будь-якого пулу завдань допомагав би отримувати оптимальний варіант розподілу за обраними критеріями розподілу. Однак, якщо користувачеві відомі характеристики обчислювальних ресурсів кластеру, технічні характеристики вхідного пулу завдань, то можна провести імітаційне моделювання за допомогою середовища GRASS та обрати оптимальний метод розподілу для конкретного пулу

вхідних завдань та обчислювальних ресурсів. Обральнику в якості найбільш ефективного рішення, ний план розподілу можливо запропонувати плану- розширив його можливості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Павлов Д.А., Кирий В.А. (2020), “Распределение производственных ресурсов в условиях многокритериальности и с учетом недетерминированности данных”, *Современная экономика: проблемы и решения*, № 11 (131), С. 66-74.
2. Аунг Чжо Мью, Анисимов А.А., Гагарина Л.Г., Портнов Е.М. (2020), “Методика повышения эффективности управления ресурсоемкими задачами в распределенных вычислительных системах”, *Инженерный вестник Дона*, №2.
3. Смирнов М.В., Климченко К.П., Потапов С.О. (2022), “Анализ метода стратегии оптимизации распределения информационно-вычислительных ресурсов в кластерах”, *Молодой ученый*, №22 (417), С.28-31.
4. Спицын А.А., Мутин Д.И. (2020), “Распределение ресурсов и планирование заданий в облачной среде на основе алгоритма оптимизации роя частиц и R-фактора”, *Моделирование, оптимизация информационные технологии*, №8(4).
5. Мельничук А.В., Сивакова Т.В., Судаков В.А. (2019), “Решение задач оптимизации с использованием мультиагентных моделей”, *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, №100, 16 с., doi: <https://doi.org/10.20948/prepr-2019-100>
6. Kolumbet V., Svynchuk O. (2021), “Simulation of resource distribution in large information systems based on multiagent approach”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, №3 (72), С. 4-11.
7. Кулешова, Е.А., Марухленко, А.Л., Добрица, В.П., Таныгин, М.О., Плугатарев, А.В. (2021), “Метод обработки данных с учетом взаимного расположения информационных блоков в масштабе вычислительного кластера”, *Вестник ВГУ. Системный анализ и информационные технологии*, №1, С. 87-97, doi: <https://doi.org/10.17308/sait.2021.1/3373>
8. Белявский Г.И., Данилова Н.В., Угольнички Г.А. (2018), “Эволюционные методы решения динамических задач распределения ресурсов”, *Математическая теория игр и ее приложения*, том 10, выпуск 1, С. 5-22.
9. Гвоздинский А.Н., Эзе Ф.М. (2014), “Исследование методов эволюционной оптимизации в задачах принятия решений в организационном управлении производством”, *Радиоэлектроника и информатика*, №4, С. 29-34.
10. Волк М.А., Филимончук Т.В. (2013), “Обобщенный критерий оценки задания для технологии планирования заданий в GRID”, *Информатика, математическое моделирование, экономика*. Том 2, С. 172-176.
11. Орлов С.П., Учайкин Р.А. (2019), “Задача распределения средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии”, *Вестник Самарского государственного технического университета*, №4 (64), С. 84-98.
12. Yesil S., Ozturk O. (2022), “Scheduling for heterogeneous systems in accelerator-rich environments”, *The Journal of Supercomputing*, №78, pp. 200-221, doi: <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03883-5>
13. Петренко А.Л., Свистунов С.Я., Свірін П.В. (2013), “Брокер ресурсов для Nordugrid ARC із використанням прогнозування часу початку виконання”, *Модельювання та інформаційні технології*, Вип. 68, С. 170-176.
14. Волк М.А., Филимончук Т.В. (2017), “Разработка модифицированного метода обратного заполнения Backfill для консервативного резервирования”, *Системы обработки информации*, №1 (147), Р. 33-37.
15. Toporkov V., Toporkova A., Tselishchev A., Yemelyanov D. (2014), “Slot Selection Algorithms in Distributed Computing”, *The Journal of Supercomputing*, Vol. 69 (1), Р. 53-60. doi: <https://doi.org/10.1007/s11227-014-1210-1>
16. Мочалов В.П., Линец Г.И., Братченко Н.Ю., Палканов И.С. (2021), “Математическая модель распределения ресурсов вычислительного кластера облачных центров обработки данных”, *Современная наука и инновации*. Вип. 4, С. 10-22, doi: <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2021.4.1>
17. Феоктистов А.Г., Костромин Р.О. (2020), “Мультиагентная модель распределения ресурсов высокопроизводительной вычислительной среды в процессе обработки потоков заданий”, *ИТНТ-2020*, Том 4, С.378-385.
18. Filimonchuk T., Volk M., Ruban I., Tkachov V. (2016), “Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system*. Vol.3/9 (81), Р. 45-53, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71892>
19. Филимончук Т.В., Волк М.А., Казмина Д.Р., Ольшанская Т.И., Рисухин М.В. (2019), “Модифицированная информационная технология распределения заданий на ресурсы для систем облачных вычислений”. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, №1 (7), С. 121-128, doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.121>
20. Волк М.А., Филимончук М.А., Филимончук Т.В. (2012), “Модуль распределения заданий в GRID-системах”, *Системы обработки информации*, №2 (100). С. 177-182.

Received (Надійшла) 11.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.03.2023

Model of distribution of the tasks pool according to computing resources

Tetiana Filimonchuk, Yuriy Koltun, Iryna Klymova, Denis Kornienko

Abstract. Topicality. Nowadays, there is a problem associated with the lack of algorithms for optimal management of the distribution of the pool of tasks that comes to the computing resources of the cluster. Schedulers that distribute tasks do not take into account the cost of using computing resources, which can reduce the execution time of the task pool. The tasks that come to the scheduler's input are heterogeneous, which also creates additional difficulties while their distribution. **The goal of this work** is to modify the task pool distribution model taking into account the distribution criteria, to develop a method for finding the optimal distribution plan, and to implement it in the GRASS simulation environment. **The object of this study** is the process of allocating the pool of tasks into the computing resources of the cluster. **The object of research** are methods and algorithms for modeling the distribution of the pool of tasks. **Results.** The proposed modification of the model of allocation of tasks to computing resources of the cluster, due to the use of allocation criteria. The criteria are implemented as a module added to the GRASS simulation environment. On the basis of a mathematical model, a method of finding the optimal plan for the distribution of tasks on the computing resources of the cluster is proposed. **Conclusions.** Allocation criteria, which are added to the task pool allocation model, are a component of the method for finding the optimal plan. Due to the use of their combinations, the search for distribution is carried out, which satisfies the requirements of task and resource providers.

Keywords: task distribution model, imitative environment, distribution criteria, best solution search method.

О. А. Янковський, С. О. Партика, В. В. Філіппов

Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ В ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІЙ ТА КЛІНІЧНІЙ МЕДИЦИНІ

Анотація. **Актуальність.** В наш час в світі широко застосовуються в харчовій промисловості біологічні домішки, зокрема карагенани (E407a). Відомо, що карагенани використовуються як емульгатори та желеутворювачі. В експериментальних дослідженнях визначено вплив карагенанів на організм людей та тварин. З наукової літератури відомо вплив цієї біодомішки на розвиток запалення кишківника. **Метою даної роботи** є вибір алгоритмів цифрової обробки зображень для об'єктивного аналізу результатів експериментальних досліджень. **Об'єктом дослідження** є біологічні об'єкти, а саме суспензія лейкоцитів та еритроцити крові щурів. **Предметом дослідження** є методи та алгоритми обробки зображень методами бінаризації. **Результати.** У даній роботі розглянути методи комп'ютерної обробки зображень біологічних об'єктів, які дозволяють покращити якість аналізу результатів експериментальних досліджень. Визначені рішення стають особливо ефективними при великому обсязі отриманих результатів досліджень, які необхідно опрацювати за короткий час. **Висновок.** Цей підхід зменшує кількість помилок, зумовлених людським фактором. Використані алгоритми можна застосувати і до інших зображень, отриманих методами, які застосовують в експериментальній та клінічній медицині. Також можна розширити функціональні можливості аналізу.

Ключові слова: суспензія лейкоцитів, зображення, клітина, карагенан, еритроцити, активні форми кисню.

Вступ

На теперішній час в світі дуже широко в харчовій промисловості застосовують біологічні домішки, однією з таких харчових добавок є карагенан. У науковій літературі визначається, що гідроколоїдні та желеутворюючі властивості карагенанів роблять їх придатними для використання у харчовій промисловості, де вони десятиліттями широко застосовуються як желеутворювачі, загусники, покращувачі текстури продуктів та емульгатори тощо [1,2].

Морські водорості є джерелами полісахаридів, зокрема агару та алгінатів. У багатьох експериментальних дослідженнях показаний вплив карагенанів на кишечник в залежності від дози застосування, та розвиток запального процесу в кишечнику [3,4].

У цілому, карагенани додаються до молочних продуктів (морозиво, молочні напої, вершки, йогурт, сир тощо) та м'ясних продуктів (ковбаси, сушене м'ясо тощо). λ -Карагенан частіше за все зустрічається в молочних продуктах та застосовується для покращення органолептичних властивостей харчових продуктів та забезпечення вершкової в'язкості.

Крім того, численні експериментальні дослідження *in vitro* та *in vivo* демонструють здатність карагенанів викликати запалення в епітеліальних клітинах кишечника шляхом сприяння вивільненню прозапальних цитокінів [5, 6]. Існують також експериментальні докази того, що макрофаги можуть поглинати харчовий карагенан з наступною міграцією до лімфатичних вузлів [7]. Робота виконана в рамках співробітництва між кафедрою біологічної хімії Харківського національного медичного університету, Науково-дослідного інституту експериментальної та клінічної медицини ХНМУ та кафедрою ЕОМ Харківського національного університету радіоелектроніки.

Метою цієї роботи є застосування комп'ютерних методів обробки зображень для покращення аналізу отриманих експериментальних досліджень, зменшення суб'єктивних похибок досліджень, викликаних людським фактором.

Основна частина

В якості першого приклада розглянемо ситуацію, коли треба оцінити відсоток морфологічно змінених клітин, наприклад на зображенні епітелію кишечника (рис. 1). У цьому дослідженні оцінювали вплив E407a на морфологічний стан тонкої кишки з використанням фарбування гематоксилін-еозином. Результати морфологічного дослідження показали, що вживання цієї харчової добавки призвело до розвитку запалення [8, 9]. У щурів, які вживали напівочищений карагенан спостерігається пошкодження ворсинок з десквамованими епітеліальними клітинами, ділянки без ворсинок або ділянки зі зміненою ворсинчастою архітектурою, запальна клітинна інфільтрація у власній пластинці. Фарбованими були відкладення колагену у слизовій оболонці тонкого кишечника щурів, які отримували E407a, порівняно з контролем [10]. Відкладення відрізняються темним відтінком по відношенню до фону, який заповнений здоровими клітинами.



Рис. 1. Мікропрепарати тонкої кишки, які були пофарбовані гематоксилін-еозином

Для зменшення похибок аналізу, обумовлених людським фактором, отримане зображення було оброблене різними методами бінаризації [11], з яких найкращий результат був отриманий за методом Отса (рис. 2).



Рис. 2. Зображення на рис.1 после бінаризації

У цьому методі обчислюється поріг t , який мінімізує середню помилку від ухвалення рішення про належність пікселів зображення об'єкту або фону. Значення яскравостей пікселів зображення розглядаються як випадкові величини, які гістограма – як оцінка щільності розподілу ймовірностей. Якщо щільності розподілу ймовірностей відомі, можна визначити оптимальний поріг для сегментації зображення на два класи c_0 і c_1 (об'єкти і тло) [12].

Дослідження ґрунтувалися на наступному: зображення подається за допомогою L рівнів яскравості; h_i - число елементів зображення, що мають яскравість i , $i = 0, 1, \dots, L-1$; N – загальна кількість пікселів на зображенні; гістограма зображення є нормалізованою і її можна розглядати як розподіл ймовірностей

$$p_i = \frac{h_i}{N}, i = 0, 1, \dots, L-1; \sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1. \quad (1)$$

Елементи зображення діляться на два класи c_0 та c_1 за допомогою порогового значення t , де клас c_0 містить пікселі з яскравостями з множини $(0, 1, \dots, t)$, а клас c_1 – пікселі з яскравостями з множини $(t+1, \dots, L-1)$. Імовірності кожного з цих двох класів та середні значення їх яскравості описуються виразами:

$$P_0 = \sum_{i=0}^t p_i = P_t; \quad (2)$$

$$P_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i = 1 - P_t; \quad (3)$$

$$\mu_0 = \sum i p_i / P_0 = \mu_t / P_t; \quad (4)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} i p_i / P_1 = (\mu_T - \mu_t) / (1 - P_t), \quad (5)$$

де $\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i$ – середня яскравість зображення.

Після отримання бінарного зображення було виконано підрахунок чорних пікселів на зображенні, який становив 60%, що дозволяє зробити висновки про ступінь відкладення колагену на даному етапі експерименту.

Другий приклад пов'язаний з оцінкою токсичного впливу дослідженої харчової домішки (E407a) карагенану на життєздатність лейкоцитів крові [13]. У попередніх експериментальних дослідженнях визначено достатній вплив карагенану на клітини крові зокрема, лейкоцити, які забезпечують імунний стан організму [14]. Для цього в Інституті експериментальної та

клінічної медицини ХНМУ дослідники фарбували ці клітини трипановим синім після інкубації цієї добавки з суспензією лейкоцитів протягом 2 годин. Використовували концентрацію 0-10 мг/мл. На рис.3, 4 наведені зображення суспензій лейкоцитів, отриманих за допомогою мікроскопа. На цих зображеннях необхідно проаналізувати кількість нежиттєздатних лейкоцитів (зафарбованих в чорний колір). До зображень на рис.3, 4 застосували метод бінаризації Отса (рис.5, 6).

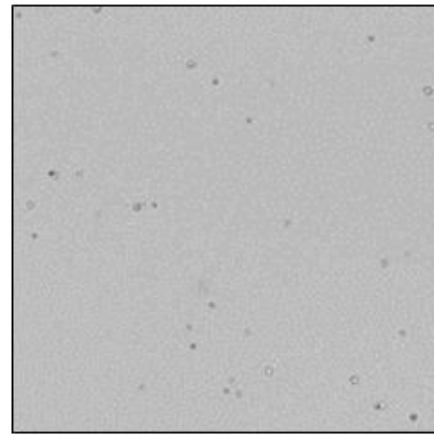


Рис. 3. Репрезентативні зображення суспензії лейкоцитів контрольної групи, забарвлених трипановим синім

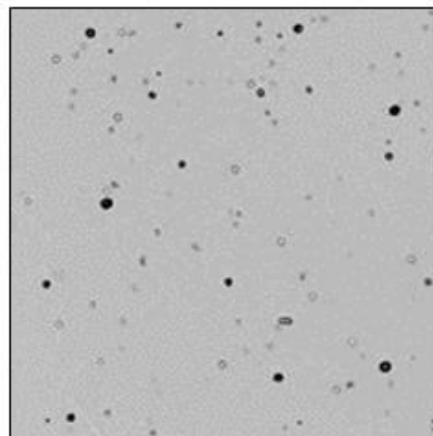


Рис. 4. Репрезентативні зображення суспензії лейкоцитів, забарвлених трипановим синім, які інкубували з E407a у концентрації 10 мг / мл протягом 2 годин in vitro

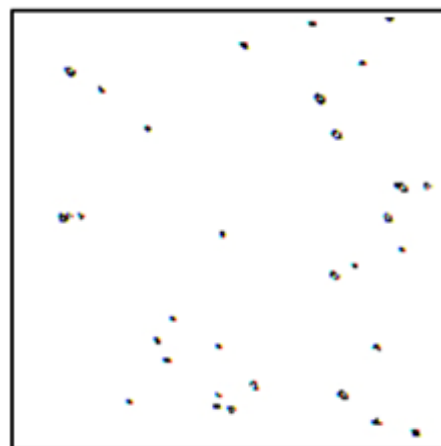


Рис. 5. Зображення суспензії лейкоцитів на рис.3 після бінаризації

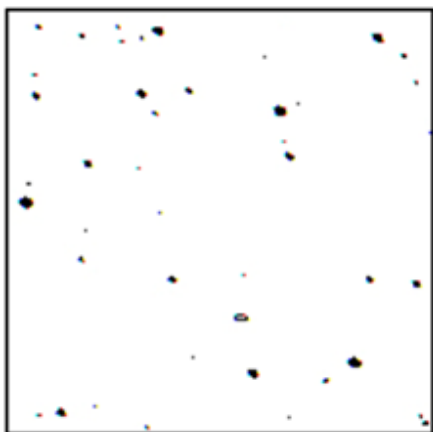


Рис. 6. Зображення суспензії лейкоцитів на рис.4 після бінаризації

Як видно на рис. 5, 6, мертві лейкоцити стають помітнішими ніж на рис. 3, 4.

Аналіз зображень на рис. 5, 6 показує, що навіть незначна концентрація E407 сприяла загибелі лейкоцитів [14].

Наступний приклад - аналіз генерації активних форм кисню в еритроцитах, що зазнали впливу харчової добавки E407a [15]. Оцінку проводили методом проточної цитометрії з використанням барвника H2DCFDA. Для цього еритроцити інкубували з E407a, фарбували анексином V-FITC для візуалізації еритроцитичних клітин за допомогою конфокальної скануючої лазерної мікроскопії [15]. Було проаналізовано зображення суспензій із концентрацією 10 мг /мл (рис. 7). Візуально зображення на рис. 3 важко проаналізувати, тому до нього були застосовані різні методи обробки зображень, з яких найкращий результат показав метод бінаризації Ніблека (рис. 8) [16].

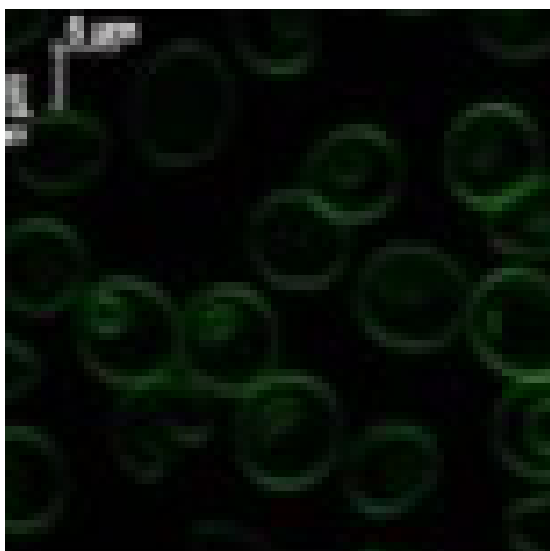


Рис. 7. Візуалізація еритроцитів, пофарбованих за допомогою анексіну V-FITC за допомогою конфокальної мікроскопії

У цьому методі для кожного пікселя зображення використовується значення порога. Визначення величини порога відбувається на основі обчислення локального середнього та локального середньоквадратичного відхилення.

Значення порога у точці з координатами (m, n) обчислюється відповідно до формули:

$$t(m, n) = \mu(m, n) + k \cdot \sigma(m, n), \quad (6)$$

де $\mu(m, n)$ – середнє, а $\sigma(m, n)$ – середньоквадратичне відхилення у локальній околиці точки зображення (m, n) [5]. Розмір околу пікселя було обрано $r = 15 \times 15$, а $k = -0.2$.

Зображення на рис.8 більш інформативно у порівнянні зі зображенням на рис.7, тому що пофарбовані еритроцити видно краще.



Рис. 8. Результат обробки зображення на рис.7 за методом бінаризації Ніблека

Проведений аналіз генерації АФК в еритроцитах за умов впливу харчової добавки E407a, дозволив оцінити підвищення інтенсивності флуоресценції ДХФ [18].

Висновки

В результаті проведених досліджень вибрано методи комп'ютерної обробки зображень біологічних об'єктів, що дозволяють покращити якість аналізу результатів експериментальних досліджень. Визначені рішення стають особливо ефективними при великому обсязі отриманих результатів досліджень, які необхідно опрацювати за короткий час. Використані алгоритми можна застосувати і до інших зображень, отриманих методами, які застосовують в експериментальній та клінічній медицині. Також можна розширити функціональні можливості аналізу. Цей підхід зменшує кількість помилок, зумовлених людським фактором.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pogozhykh D, Posokhov Y, Myasoedov V, Gubina-Vakulyck G, Chumachenko T, Knigavko O, Polikarpova H, Kalashnyk-Vakulenko Y, Sharashydzhe K, Nakonechna O, Prokopyuk V, Onishchenko A, Tkachenko A. Experimental Evaluation of Food-

- Grade Semi-Refined Carrageenan Toxicity. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(20):11178. <https://doi.org/10.3390/ijms22011178>
2. Ткаченко А.С. Влияние перорального употребления пищевой добавки E407a на апоптоз моноцитов крови крыс. Материали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю «Сучасні підходи до терапії та медичної реабілітації хворих з внутрішньою та професійною патологією» – 2019. – (20-21 листопада 2019 р.). – м. Запоріжжя. — С. 18-19.
 3. Tkachenko AS, Onishchenko AI, Gorbach TV, Nakonechna OA, Shekhovtsova EV, Gubina-Vakulyck GI. HSP90 α overexpression in small intestinal mucosa and high blood serum levels of HSP70 and 8-isoprostane in carrageenan-induced intestinal inflammation. *HVM Bioflux* 2019;11(1):1-5.
 4. Ткаченко АС, Онищенко АИ, Ткаченко МА, Тонкошкур СН. Оценка экспрессии HSP90 α в тонком кишечнике крыс при E407a-индуцированном энтерите. Материали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Актуальні питання клінічної медицини» – 2018. – (26 жовтня 2018 р.). – м. Запоріжжя. — С. 88-89.
 5. A.S. Tkachenko, A.I. Onishchenko, H.V. Polikarpova. A common food additive E407a promotes infiltration of the small intestinal lamina propria with CD3⁺ and CD68⁺ cells in rats. Збірник тез конференції-конкурсу молодих вчених «Актуальні проблеми біохімії та біотехнології 2021» -2021. – (20-21 травня 2021 р.). – м. Київ. – С. 10.
 6. А.С. Ткаченко, А.І. Онищенко, Г.І. Губіна-Вакулик, О.А. Наконечна. Пероральне вживання харчової добавки E407A індукує коліт у шурів. Материали четвертої всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОЇ МОРФОЛОГІЇ» (4-6 листопада 2020 року). - м. Дніпро, Україна. – с. 108-109.
 7. Álvarez-Viñas M, Souto S, Flórez-Fernández N, Torres MD, Bandín I, Domínguez H. Antiviral Activity of Carrageenans and Processing Implications. *Marine Drugs*. 2021; 19(8):437. <https://doi.org/10.3390/md19080437>
 8. Tkachenko AS, Onishchenko AI, Gorbach TV, Nakonechna OA, Gubina –Vakulyck GI. HSP90 α expression in the small intestine and HSP70 blood serum levels in rats with carrageenan-induced enteritis. FEBS3+ Meeting – XIth Parnas Conference. Poster session VII. *Ukr. Biochem. J.*, 2018, Vol. 90, Special Issue–P. 148.
 9. А.С. Ткаченко, Г.І. Губіна-Вакулик, О.А. Наконечна, Г.В. Полікарпова, А.І. Онищенко. Зміни експресії фасцину, віментину та Е-кадгерину у власній пластинці товстої кишки при вживанні харчової добавки E407a шурами. Материали п'ятої міжнародної наукової конференції «Актуальні проблеми сучасної біохімії, клітинної біології та фізіології». - 2020. – 1-2 жовтня 2020 р. - м. Дніпро, Україна. – с. 46-47.
 10. А.С. Ткаченко, А.І. Онищенко, Г.І. Губіна-Вакулик, О.А. Наконечна. Пероральне вживання харчової добавки E407A індукує коліт у шурів. Материали четвертої всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОЇ МОРФОЛОГІЇ» (4-6 листопада 2020 року). - м. Дніпро, Україна. – с. 108-109.
 11. Гонсалес Р. Вудс Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB – [Текст] / Р. Гонсалес Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006 – 616 с.
 12. *Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histograms *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66,1979.
 13. Tkachenko AS, Kot YG, Kapustnik VA, Myasoedov VV, Makieieva NI, Chumachenko TO, Onishchenko AI, Lukyanova YM, Nakonechna OA. Semi-refined carrageenan promotes generation of reactive oxygen species in leukocytes of rats upon oral exposure but not in vitro. *Wien Med Wochenschr*. 2021 Mar;171(3-4):68-78. doi: 10.1007/s10354-020-00786-7.
 14. Tkachenko A, Onishchenko A. Oral Intake of Semi-refined Carrageenan by Rats Affects Apoptosis of Lymphocytes. *Annals of Colorectal Research*, 2020;8(4):170-174. doi: 10.30476/acrr.2021.88624.1068
 15. Tkachenko A, Kot Y, Prokoryuk V, Onishchenko A, Bondareva A, Kapustnik V, Chumachenko T, Perskiy Y, Butov D, Nakonechna O. Food additive E407a stimulates eryptosis in a dose-dependent manner. *Wien Med Wochenschr*. 2021 Aug 12. doi: 10.1007/s10354-021-00874-2. Epub ahead of print. PMID: 34383224. <https://doi.org/10.1007/s10354-021-00874-2>.
 16. *Niblack W.* An Introduction to Digital Image Processing, pp. 115–116. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1986.
 17. Ткаченко АС, Онищенко АИ, Ткаченко МА, Тонкошкур СН. Оценка экспрессии HSP90 α в тонком кишечнике крыс при E407a-индуцированном энтерите. Материали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Актуальні питання клінічної медицини» – 2018. – (26 жовтня 2018 р.). – м. Запоріжжя. — С. 88-89.

Received (Надійшла) 22.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.03.2023

Application of computer image processing methods in experimental and clinical medicine

Oleksandr Yankovsky, Stanislav Partyka, Vladlen Filippov

Abstract. Topicality. Nowadays, biological additives, in particular carrageenans (E407a), are widely used in the food industry. It is known that carrageenans are used as emulsifiers and gelling agents. In experimental studies, the influence of carrageenans on the body of humans and animals has been determined. The impact of this bioadmixture on the development of intestinal inflammation is known from the scientific literature. **The goal of this work** is the selection of digital image processing algorithms for the objective analysis of experimental research results. **The object of research** is biological objects, namely a suspension of leukocytes and erythrocytes of rat blood. **The subject of research** is the methods and algorithms of image processing by binarization methods. **Results.** In this work, we consider the methods of computer processing of images of biological objects, which allow to improve the quality of the analysis of the results of experimental studies. The identified solutions become especially effective when there is a large amount of research results obtained, which must be processed in a short time. **Conclusions.** This approach reduces the number of errors caused by the human factor. The used algorithms can be applied to other images obtained by methods used in experimental and clinical medicine. You can also expand the functionality of the analysis.

Keywords: leukocyte suspension, image, cell, carrageenan, erythrocyte, reactive oxygen species

V. Yareshchenko, V. Kosenko

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

CODING TO REDUCE THE ENERGY OF DATA MOVEMENT

Abstract. The problem of reducing power dissipation in global interconnection lines while maintaining high performance is considered in the paper. High switching activity leads to significant communication losses due to communication capacitances between long lines. New byte-addressed non-volatile memory technologies, such as phase-change memory, enable systems with large persistent memory, improving reliability and potentially reducing power consumption. However, these technologies only support a limited number of write operations over the lifetime per cell, and consume most of their power when the state of a bit changes during a write. Low power coding techniques are required to reduce switching activity during device-to-device or on-chip communications. **The purpose of the article** is to develop a method for constructing a set of unit distance codes, analyzing their characteristics and choosing codes that satisfy the given properties. The address bus coding methods with the least switching activity are considered. To reduce dynamic energy losses in the address bus and minimize communication losses between closely spaced lines, Gray code is used, which has a number of disadvantages. **Conclusions.** The type of codes that have the same properties as Gray codes, i.e. unit distance codes, is determined. A method for constructing a set of unit distance codes, analyzing their characteristics, and choosing codes that satisfy the given properties has been developed. By using the entire set of codes, developers have more choices than using only Gray codes, and this leads to better results.

Keywords: Gray code, switching activity, hypergraph, non-volatile memory.

Introduction

Statement of the problem. Computer systems are widely used in various fields of science and technology in the construction of control systems, regulation, transmission and processing of discrete information.

To ensure the required level of quality of their functioning and reliability different approaches are used: improvement of existing and organization of fundamentally new systems, their hardware and software, creation of algorithmic, hardware and software, control and diagnostic support.

Modern processors are becoming increasingly bottlenecked by the energy of moving data across different levels of the memory hierarchy and between different input-output devices, such as sensors and specialized gas pedals.

Reducing power dissipation in global interconnect lines while maintaining high performance is an ongoing challenge for scalable CMOS technology.

Analysis of recent research and publications. There are many approaches to reducing input-output power consumption. These approaches fall into two categories. The first consists of methods that optimize the memory hierarchy and data organization to eliminate input-output requirements in the first place. The second category consists of methods that reduce switching activity on buses [1, 2].

External input-output and associated buses are a major contributor to overall system power consumption [3, 4]. The input-output power consumption is in direct relation to the product of the switching activity present on the input-output by the average capacitive load of the switching elements. In [5, 6], it was shown that the capacitive load of the external input/output is several orders of magnitude greater than that of the internal switching nodes.

High switching activity leads to significant communication losses due to communication capacitances between long lines. The long lines of the

address bus are accessed very frequently. As a result of these factors, the instruction memory address bus is usually one of the most power-consuming components of an embedded system [7, 8].

New non-volatile byte addressable memory technologies, such as phase transition memory, enable systems with large persistent memory, improving reliability and potentially reducing power consumption. However, these technologies support only a limited number of write operations over the lifetime per cell and consume most of their power when the bit state changes during writes [9].

Consequently, low-power coding techniques are required to reduce switching activity during device-to-device or on-chip communication.

Various methods are used to encode the address bus with the lowest switching activity. Gray's codes are used to reduce dynamic energy [10, 11]. The use of Gray's coding ensures that only one bit is switched between consecutive addresses. Since access to instruction memory is often continuous, the use of Gray's codes not only reduces dynamic energy loss on the address bus, but also minimizes communication loss between closely spaced lines. However, Gray's code has low balance and a large number of bit switches.

The aim of the article is to develop a method for constructing a set of unit distance codes, analyzing their characteristics, and selecting codes that satisfy the given properties.

Presentation of the main material of the study

Gray codes are known as unit distance codes (single-step or monostrophic). A unit distance code is an unweighted code that changes only one digit position when moving from one number to another in a number sequence [12, 13].

The graph model of Gray's codes is a hypercube graph. In graph theory, a hypercube graph Q_n is a regular graph with 2^n vertices, $2^{n-1}n$ edges and n edges converging to one vertex [14].

A regular (homogeneous) graph is a graph with degrees of all its vertices equal, i.e. each vertex has the same number of neighbors.

Below we consider the hypercube graph Q_n with labeled vertices.

A labeled vertex is additional information associated with a vertex, which allows to distinguish it from other labeled vertices.

For the considered problem numbering of vertices will start from number "0" and each vertex will correspond to n-digit binary code $a_1a_2...a_n$, where a_i is 0 or 1. Two vertices (or points) of cube Q_n are adjacent if their binary representations differ only in one position (one digit). Fig. 1 shows the graph of hypercube Q_3 , binary codes of vertices and their notation.

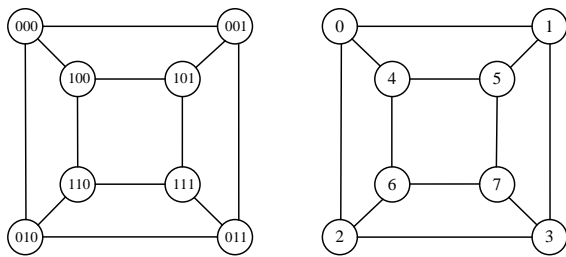


Fig. 1. Hypercube Q_3 graph

A path in graph G is an alternating sequence of vertices and edges that begins and ends with a vertex, each edge of the sequence is incident to two vertices, one of which immediately precedes it, and the other immediately follows it. The specified path connects vertices v_0 and v_k , and it can be denoted by $v_0v_1v_2...v_k$. A path in which all vertices are different is called simple. A path in which, $v_0=v_k$, is called closed (or cycle) and open otherwise. A closed path is called a simple cycle if all its n vertices are distinct and $n \geq 3$ [15].

A simple path passing through each vertex of the graph exactly once is called a Hamiltonian path. A Hamiltonian path differs from a Hamiltonian cycle in that the start and ends of the path may not coincide, unlike a cycle. A Hamiltonian cycle is a Hamiltonian path. Any hypercube Q_n with $n > 1$ has a Hamiltonian cycle passing through each vertex exactly once.

The Hamiltonianness of a hypercube is closely related to Gray's code theory. More precisely, there exists a bijective correspondence between the set of n-bit cyclic Gray codes and the set of Hamiltonian cycles in the hypercube Q_n . A similar property holds for acyclic n-bit Gray's codes and Hamiltonian paths [16].

In terms of graph theory, the problem of constructing a set of unit distance codes is reduced to constructing a set of Hamiltonian paths (cycles) in a hypercube.

To construct a set of Hamiltonian paths in graph Q_n an algorithm was developed, which was described using the following notations:

U - path to be formed,

$L(U)$ - length of path to be formed,

$U(i)$ - number of vertex at the i-th place in the path U ,

$v \rightarrow U$ means writing the vertex v into the path U ,

$O(v)$ - neighborhood of vertex v - set of vertices adjacent to vertex v ,

$A(v) = \{v^{a_1}, \dots, v^{a_e}\}$ is the set of active vertices in the neighborhood of vertex v . A vertex is called active if it is not included in the formed path U ,

e is the number of active vertices,

$B = \{B_1, \dots, B_s\}$ - set of promising initial paths (for further consideration),

s - number of promising initial paths,

d - current number of initial paths,

$B_i \rightarrow B$ means writing path B_i to the set of promising paths B ,

$R = \{U_1, \dots, U_q\}$ is the set of formed Hamiltonian paths,

q is the number of formed Hamiltonian paths,

$U \rightarrow R$ means the entry of a new formed path,

t is the current number of the vertex in question.

The algorithm for constructing Hamiltonian paths in graph Q_n consists of the following steps:

1. $q = 0$.

2. $d = 0, s = 0$.

3. $d = d + 1$.

4. $U = B_d$.

5. $t = L(U)$.

6. Determine the neighborhood of vertex $O(v), v = U(t)$.

7. Define the set of active vertices

$A(v) = \{v^{a_1}, \dots, v^{a_e}\}$.

8. If $e = 0$, go to step 13.

9. Write the vertex v^a into the generated path: $v^{a_1} \rightarrow U$.

10. If $e = 1$, go to step 6.

11. Form new prospective initial paths:

$s = s + j, v^{a_j} \rightarrow B_s, B_s \rightarrow B, j = 1, \dots, e - 1$.

12. We proceed to step 6.

13. If $L(U) = n$, then a new Hamiltonian path is formed. Write it down: $q = q + 1; U \rightarrow R$.

14. If $d = s$, then the end of the algorithm.

15. We choose the next promising initial path: go to step 3.

Table 1 shows an example of the algorithm's work, Table 2 shows the process of selecting vertices during the algorithm's work.

Table 1 – An example of algorithm work

d	U	t	O(v)	A(v)	v^{a_1}	s	B_s
0	0	0	124	124	1	1	02
						2	04
	01	1	35	35	3	3	015
	013	3	127	27	2	4	0137
	0132	2	036	6	6		
	01326	6	247	47	4	5	013267
	013264	4	056	5	5		
	0132645	5	147	7	7		
	01326457	7	-	-	-		
1	02	2	135	35	3	6	026
	023	3	127	17	1	7	0237
	0231	1	035	5	5		
	02315	5	147	47	4	8	023157
	023154	4	056	6	6		
	0231546	6	247	7	7		
	02315467	7	-	-	-		
2	04	4	056	56	5	9	046
	045	5	147	17	1	10	0457
	0451	1	035	3	3		
	04513	3	127	27	2	11	045137

3	045132	2	035	6	6		
	0451326	6	247	7	7		
	04513267	7	-	-	-		
	015	5	147	47	4	12	0157
	0154	4	056	6	6		
	01546	6	247	27	2	13	015467
	015462	2	036	3	3		
0154623	3	127	7	7			
01546237	7	-	-	-			

4	0137	7	356	56	5	14	01376
	01375	5	147	4	4		
	013754	4	056	6	6		
	0137546	6	247	2	2		
01375462	2	-	-	-			
5	013267	7	356	5	5	-	
	0132675	5	147	4	4	-	
	01326754	4	-	-	-		
...							

Table 2 – Selection of vertices during the work of the algorithm

Nv	Hamiltonian path number																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18								
1	0																									
2	1																									
3	3			5			3			6			5			6										
4	2		7		4		7		1		7		4		7		1		7		2		7			
5	6		5		6		3		5		6		5		3		3		6		3		5			
6	4		7		4		2		7		2		4		7		4		1		7		1		1	
7	5		5		6		3		3		6		6		6		5		3		3		5		3	
8	7		4		2		7		2		4		7		4		1		7		1		4		2	

For all code variants the corresponding binary matrix is formed, the number of changes in the values of each variable (bit) in column h_j is determined as follows:

$$h_i = \sum_{j=2}^k (x_{i,j-1} \oplus x_{i,j}), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

where n is the number of digits of the binary code (the number of matrix columns), k - the number of binary sets (the number of rows of the binary matrix), X_i - the i -th binary code, $X_i = \{x_{i,1} \dots x_{i,n}\}$, where $x_{i,1} \dots x_{i,n}$ - bits of the i -th binary code. The balance of code C is defined as follows:

$$C = \sum_{i=1}^n |h_i \cdot \left(\sum_{j=1}^n h_j \right) / n|. \quad (2)$$

Table 3 shows the Hamiltonian paths (U) for $v_0=0$ and the balance (C) of the corresponding binary code obtained with the above algorithm.

The analysis of the obtained unit distance codes given in the table shows that the set of codes consists of acyclic n -bit codes and corresponding Hamiltonian paths as well as cyclic n -bit codes and corresponding Hamiltonian cycles in the hypercube Q_n . Fig. 2 shows examples of cyclic and acyclic codes. Depending on the balance value of the C code and the number of changes of values of each variable $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$, the set of unit distance codes can be divided into three classes.

Table 3 – Hamiltonian paths and their characteristics

№	U	C	№	U	C
1	01326457	2.7	10	02645137	2.7
2	01326754	3.3	11	02645731	3.3
3	01375462	1.3	12	02673154	1.3
4	01546237	2.7	13	04513267	2.7
5	01546732	3.3	14	04513762	3.3
6	01573264	1.3	15	04576231	1.3
7	02315467	2.7	16	04623157	2.7
8	02315764	3.3	17	04623751	3.3
9	02376451	1.3	18	04675132	1.3

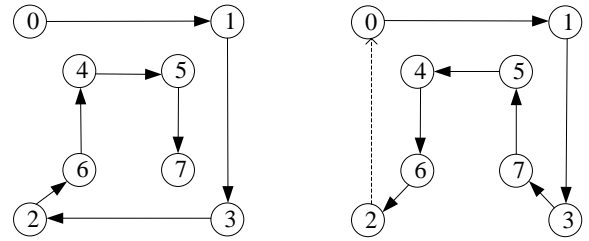


Fig. 2. Example of an acyclic and cyclic path

Table 4 shows decimal equivalents of binary codes (D), position code (Bin) and representatives of codes of each class (U_1, U_2, U_3) and their characteristics. It should be noted that Gray code belongs to the second class.

Table 4 - Binary codes and their characteristics

D_0	Bin			D_1	U_1			D_2	U_2			D_3	U_3		
	x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
2	0	1	0	3	0	1	1	3	0	1	1	3	0	1	1
3	0	1	1	2	0	1	0	2	0	1	0	7	1	1	1
4	1	0	0	6	1	1	0	6	1	1	0	5	1	0	1
5	1	0	1	4	1	0	0	7	1	1	1	4	1	0	0
6	1	1	0	5	1	0	1	5	1	0	1	6	1	1	0
7	1	1	1	7	1	1	1	4	1	0	0	2	0	1	0
H	1	3	7		1	3	3		1	2	4		2	3	2
C		6.7				2.7				3.3				1.3	

Conclusions and prospects for further research in this area

Technological trends and especially portable applications are driving the search for integrated circuits with low power consumption. Solutions are sought that include algorithmic, structural, or physical transformations.

Address bus coding methods with the lowest switching activity are considered. Gray's code, which has low balance and a large number of bit switches, is used to reduce dynamic energy losses in the address bus and to minimize communication losses between closely spaced lines. A type of codes with the same properties

as Gray codes, the unit distance codes, has been defined. We have developed a method for constructing a set of unit distance codes, analyzing their characteristics, and selecting codes that satisfy the given properties. By using the whole set of codes, developers have more choices than when using only Gray codes, and this allows to get better results in terms of branching, propagation delays, power consumption or other related limitations when designing digital systems.

Further research in this direction: developing a method for classifying codes with respect to a given group of transformations, compiling catalogs of typical representatives, and constructing code converters.

REFERENCES

1. Singh B., Khosla A., Narang S. B. Low power bus encoding techniques for memory testing // *Microelectron Solid State Electron.* – 2013. – V. 2. – № 3. – P. 45-51. DOI: [10.5923/j.msse.20130203.02](https://doi.org/10.5923/j.msse.20130203.02)
2. Serkov A., Trubchaninova K., Lazurenko B. Noise stability of mobile telecommunication systems. *Control, Navigation and Communication Systems.* Poltava: PNTU, 2020. VOL. 2 (60). P. 169-172. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.169>
3. Bittman D. et al. Optimizing Systems for Byte-Addressable NVM by Reducing Bit Flipping // *FAST.* – 2019. – P. 17-30.
4. Kulandai A. D. R., Rose J., Schwarz T. Gray counters for non-volatile memories // *Memories-Materials, Devices, Circuits and Systems.* – 2022. – V. 2. – P. 100-114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memori.2022.100014>
5. Mittal S., Nag S. A survey of encoding techniques for reducing data-movement energy // *Journal of Systems Architecture.* – 2019. – V. 97. – P. 373-396.
6. Zhao Z., Wang Z., Min G., Cao Y. Highly-efficient bulk data transfer for structured dissemination in wireless embedded network systems. *Journal of Systems Architecture.* 2017. V. 72. P. 19-28. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sysarc.2016.09.001>
7. Wang S., Ipek E. Reducing data movement energy via online data clustering and encoding // *International Symposium on Microarchitecture (MICRO).* – 2016. – P. 1-13.
8. Korablyov, M., Lutskey, S. System-information models for intelligent information processing // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries.* – 2022. – № 3 (21). – P. 26–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.026>
9. Seol H., Shin W., Jang J., Choi J. Energy efficient data encoding in DRAM channels exploiting data value similarity // *International Symposium on Computer Architecture (ISCA).* – 2016. – P. 719-730.
10. Lee D., O'Connor M., Chatterjee N. Reducing Data Transfer Energy by Exploiting Similarity within a Data Transaction // *IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA).* – 2018. – P. 40-51.
11. Volk M., Lunichkin O., Self-healing computer systems // *Control, Navigation and Communication Systems.* *Academic Journal.* – Poltava: PNTU, 2022. – VOL. 1 (67). – P. 48-51. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.048>
12. Mittal S., Inukonda M. A Survey of Techniques for Improving Error-Resilience of DRAM // *Journal of Systems Architecture.* – 2018. – V. 91. – P. 11-40.
13. Lada N., Rudnytska Y. Implementation of a method for synthesizing groups of symmetric double-operand operations of cryptographic information coding for block encryption systems // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries.* – 2022. – № 2 (20). – P. 35– 43. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.20.035>
14. Mütze T., Nummenpalo J. Efficient computation of middle levels Gray codes // *ACM Transactions on Algorithms (TALG).* – 2018. – V. 14. – № 2. – P. 1-29.
15. Kandel A., Bunke H., Last M. *Applied Graph Theory in Computer Vision and Pattern Recognition* // Springer, 2007. – 261 p.
16. Mills, W. H. Some complete cycles on the n-cube // *Proceedings of the American Mathematical Society, American Mathematical Society.* – 1963. – V. 14. – № 4. – P. 640-643.

Received (Надійшла) 20.02.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.03.2023

Кодування для зменшення енергії руху даних

В. В. Яреценка, В. В. Косенко

Анотація. Розглянуто проблему зменшення розсіюваної потужності у глобальних лініях між'єднань за збереження високої продуктивності. Висока комутаційна активність призводить до значних втрат зв'язку через ємності зв'язку між довгими лініями. Нові технології енергонезалежної пам'яті з байтовою адресацією, такі як пам'ять із фазовим переходом, дозволяють створювати системи з великою постійною пам'яттю, підвищуючи надійність та потенційно знижуючи енергоспоживання. Однак ці технології підтримують лише обмежену кількість операцій запису протягом усього терміну служби на комірку та споживають більшу частину своєї потужності при зміні стану біта під час запису. Для зниження комутаційної активності під час зв'язку між пристроями або на кристали потрібні методи кодування з низьким енергоспоживанням. Мета статті: розробка методу побудови безлічі кодів одичинної відстані, аналізу їх характеристик та вибору кодів, що задовольняють задані властивості. Розглянуто методи кодування адресної шини із найменшою комутаційною активністю. Для зменшення динамічних втрат енергії в адресній шині та мінімізації втрат зв'язку між близькими лініями застосовують код Грея, який має ряд недоліків. Визначено вид кодів, що мають ті ж властивості, що і коди Грея - коди одичинної відстані. Розроблено метод побудови безлічі кодів одичинної відстані, аналізу їх характеристик та вибору кодів, що задовольняють заданим властивостям. Завдяки використанню всієї множини кодів у розробників є більше варіантів вибору, ніж при використанні тільки кодів Грея, і це дозволяє отримати кращі результати.

Ключові слова: код Грея, комутаційна активність, гіперграф, енергонезалежна пам'ять.

О. О. Ченчева¹, С. В. Сукач¹, І. С. Петренко², Н. В. Караєва³

¹ Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

² Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

³ Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ПРИНЦИП ПОБУДОВИ БАЛЬНО-МОДИФІКОВАНОЇ ДІАГРАМИ ІСІКАВИ ЯК СУЧАСНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ АНАЛІЗУ РИЗИКІВ ВИДОБУВНИХ ТА МЕХАНООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Мета. Запропоновано принцип побудови бально-модифікованої діаграми Ісікави, як сучасного інструментарію аналізу ризиків видобувних та механообробних підприємств з обробки карбонових композитів. **Предмет.** Обґрунтування застосування управлінських рішень з організації заходів охорони праці щодо зниження впливу небезпечних та шкідливих чинників шляхом використання систематизованих даних у запропонованій Score-modified Cause-effect Diagram (бально-модифікованої діаграми Ісікави), а також дослідження проблеми адаптивної оцінки ризиків та небезпек, яка наявна в діючих стандартах. Запропоновано використання способу вирішення поставленої проблеми, шляхом застосування бально-модифікованої причинно-наслідкової діаграми, як сучасного інструментарію аналізу ризиків при плануванні та раціоналізації заходів з охорони праці на підприємствах.

Ключові слова: аналіз ризиків, бально-модифікована діаграма, профзахворювання, безпека праці.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій

У зв'язку з підвищенням рівнем професійної захворюваності робітників промисловості особливу увагу приділяють управлінню ризиками та створенню безпечних умов праці. В результаті проведеного статистичного аналізу Фондом соціального страхування України було встановлено, що за 2022 рік у порівнянні з аналогічними даними за 2021 року показник нещасних випадків і гострих професійних захворювань знизився на 31,2% [1]. Дана ситуація пояснюється звітністю центру медичної статистики МОЗ, а також державною службою статистики України відповідно яких зменшується кількість підприємств, установ та організацій, тобто робочих місць за рахунок активних бойових дій на території України. Останнім часом відповідно бази даних автоматизованої інформаційної системи «Профзахворюваність» переважає захворюваність на підприємствах гірничодобувної промисловості та підприємствах обробки високотехнологічних надміцних матеріалів на основі вуглецевих волокон, що становить майже 80 %. В такій ситуації єдиним дієвим способом захисту є управління ризиками, який дозволить обґрунтувати вибір інженерно-технічних заходів для створення безпечних умов праці та зниженню кількості нещасних випадків та гострих професійних захворювань з урахуванням можливості ранжування окремих небезпечних факторів.

У сучасній практиці відомо багато різних методів оцінки ризику, які дозволяють комплексно оцінювати умови праці у різних галузях промисловості. Застосування комплексного підходу аналізу ризиків дозволяє здійснювати оцінку впроваджених заходів щодо управління ризиками та отримання комплексної картини існуючих умов праці на виробництві з

можливістю графічного виділення всіх складових здатних впливати на рівень безпеки та необхідності розробки першочергових превентивних заходів та можливості оцінки ефективності та доцільності їх впровадження. Сучасні методики такі як ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 містять в собі різні підходи до загальної оцінки ризиків, рекомендовані до застосування у міжнародній практиці [2]. Однак в зазначеному стандарті немає готових рішень для адаптивної комплексної оцінки з урахуванням конкретних робочих місць на різних підприємствах або установах. Тому керуючись стандартом кожне окреме підприємство галузі може обирати той чи інший метод відповідно до власного досвіду і вимог законодавства, а також вносити зміни які залежать від статистики нещасних випадків та професійних захворювань на конкретному підприємстві або установі. Також процедура оцінки ризиків передбачає складання карт ідентифікації небезпек, або карти ризиків, яку проводять експерти за ustalеними характеристиками небезпек (ризиків), суб'єктивно надаючи свою експертну оцінку тому чи іншому виду ризиків.

Останні дослідження різних авторів пропонують доповнити карти ризиків введенням емпіричних методів аналізу умов праці для виявлення причинно-наслідкового зв'язку між різними шкідливими та небезпечними факторами на основі інструментів візуалізації та систематизації даних – діаграму Ісікави (діаграма «Риб'ячий скелет», Cause-effect diagram), тобто як додатковий інструмент аналізу карт ризику [3], з можливістю ілюстрації систематизованого зв'язку між досліджуваними показниками, що дає змогу навіть не експертам зрозуміти суть виникаючих проблем (небезпек, ризиків) і знайти ефективні способи їх запобігання. Тобто на основі діаграми провести оцінку потенційних причин і наслідків нещасних випадків та профзахворювань з можливістю ранжу-

вання рівня їх важливості та відображенням графічної схеми ієрархії у вигляді «риб'ячого скелету».

Постановка завдання та його вирішення

Причинно-наслідкова діаграма - це інструмент, який дозволяє виявити найбільш істотні причини (чинники), що впливають на кінцевий результат (наслідок). Її було запропоновано у 1953 р. професором Токійського університету К. Ісікавою.

Причини, які впливають на проблему, зображуються похилими стрілками (рис. 1), причому загальні причини (причини першого порядку) - похилими великими стрілками, частинні (причини другого та наступного порядку) - маленькими похилими стрілками. У літературі аналізована діаграма називається також «риб'ячим скелетом». Проблема, яка вивчається це «голова риби», «хребет» умовно зображується у вигляді прямої горизонтальної стрілки, «кістки» - причини - зображуються похилими стрілками. Загальна діаграма Ісікави з основними категоріями причин представлена на рис. 1.

На виробництві всі можливі причини розподіляють за групами (категоріями) за принципом "5М":

- 1) man (людина) - причини, пов'язані з людським фактором;
- 2) machines (машини, обладнання) - причини, пов'язані з обладнанням;
- 3) materials (матеріали) – причини, пов'язані з матеріалами;
- 4) methods (методи, технологія) - причини, пов'язані з технологією роботи, організацією процесів;
- 5) measurements (вимірювання) - причини, пов'язані з методами вимірювання, контролю якості.

Для кожної групи будуються додаткові «кістки», які мають окремі причини, а ті, у свою чергу, підлаштовують свої причини. В результаті виходить розгалужене дерево, що пов'язує причини виникнення невідповідності, які знаходяться на рівні деталізації. У такий спосіб можна віднайти первинні причини, усунення яких найбільш істотно вплине на вирішення проблеми.

До переваг методу можна віднести можливість зосередження групи на змісті проблеми; групування причини у самостійні категорії; зосередження групи на пошуку причин, а не ознак, що добре застосовується при груповому обговоренні, створює результат колективного знання; легкість сприйняття та застосування.

Вхідними даними для побудови діаграми Ісікави можуть бути рівень фахової компетентності та досвід учасників, або попередньо розроблена модель, яка була використана минулому.

Аналіз причинно-наслідкових зв'язків повинно проводитися групою експертів, добре обізнаних з

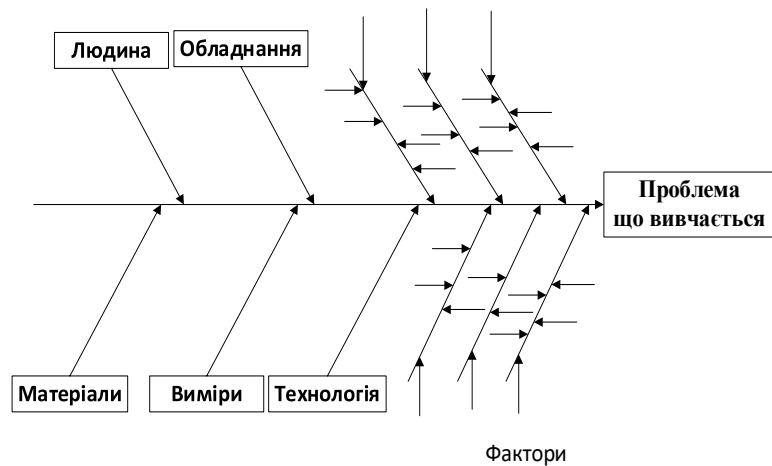


Рис. 1. Стандартна діаграма Ісікави з основними категоріями причин

проблемою, яку потрібно розв'язати. Основні етапи аналізу причинно-наслідкових зв'язків зображені на рис. 2.



Рис. 2. Основні етапи аналізування причинно-наслідкових зв'язків

Отримана інформація з існуючих причинно-наслідкових діаграм Ісікави для планування заходів зі зниження ризиків небезпек на робочих місцях підприємств візуально не прийнятна та для аналізу і вирішення комплексних проблем та є надто нечіткою.

Крім того для вирішення задач моделювання спільного впливу шкідливих та небезпечних чинників використання цього методу взагалі неможливо.

Тому було прийнято зважене рішення щодо удосконалення існуючого підходу до побудови діаграми Ісікави, яка передбачає групування і ранжування чинників за значенням показників в системі «людина-виробниче середовище-техніка», які характеризують ступінь ризику виникнення досліджуваної проблеми, що впливають на безпеку працівників на відповідних робочих місцях (пріоритетного числа ризику).

На основі триманої інформації та запропонованих заходів щодо зниження впливу небезпечних та шкідливих чинників є можливість побудувати ball-modified Cause-effect diagram (бально-модифіковані діаграми Ісікави).

Запропонований алгоритм побудову модифікованої діаграми наведено на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм побудови бально-модифікованої діаграми «причина-наслідок»(діаграма Ісікави)

Для інтеграції експертних даних у діаграми розглядаються методи роботи, матеріали, види праці (ручна або автоматизована) та виробниче середовище.

Тобто враховуються способи організації діяльності та режими її виконання.

Це дозволяє корегувати причинно-наслідкові зв'язки при зміні обладнання або технологічного процесу на робочих місцях.

На деяких підприємствах додатковим інструментом аналізу і побудови діаграми доцільним є використання карти ризиків підприємства, з яких

необхідно проаналізувати наявні проблеми та виконати коригувальну дію.

В такому випадку запропонований метод побудови діаграми причинно-наслідкових зв'язків має наступні переваги:

- увагу експертів можна зосередити на конкретній проблемі;
- дає змогу полегшити визначення першопричин проблеми застосуванням структурованого підходу;
- сприяє співпраці у групі та використанню знань групи щодо продукції чи процесу;
- дає змогу використати впорядкований і зручний для сприйняття формат відображення залежностей у діаграмі;
- вказує на можливі причини зміни процесу;
- дає змогу визначити сфери, у яких треба збирати дані для подальшого вивчення та вдосконалення.

До діаграми Ісікави було введено декілька візуальних змін (рис. 4):

1. Поділ її на візуальні зони за категоріями ризиків, а саме на: високу категорію ризику (High), середню категорію (Middle), низьку категорію (Low) згідно експертних оцінок;

2. До джерел небезпек (небезпечні та шкідливі чинники) було додано рейтинг початкового ризику (що є добутком імовірності та тяжкості ризику) із вказанням категорії ризику (наприклад: недостатня освітленість робочої зони (Middle, 50);

3. Додані додаткові блоки «причина» та «рішення» (бально-модифікована діаграма є альтернативою існуючих карт ризику).

Фрагмент візуалізації бально-модифікованої діаграми робочого міста при механічній обробці високотехнологічних композиційних матеріалів на основі вуглецевих волокон наведено на рис. 4.

Застосування представленої діаграми та циклу PDCA (Шухарта-Демінга) [4], який є логічною послідовністю повторюваних дій, спрямованих на безперервне вдосконалення процесів, запропоновано заходи, що передбачають планування, реалізацію, аналіз та коригування плану дій, послідовність виконання яких забезпечує зниження ризику небезпек на робочих місцях видобувних та металообробних підприємств:

1. Основна тема (безпека та гігієна праці).
2. Постановка задачі (визначення робочих місць).
3. Цільове формулювання, що визначає завдання проекту (зниження ризику небезпек на робочих місцях).
4. Наукова основа процесу (цикл PDCA), тобто метод, застосований вивчення проблеми.
5. Методи системного аналізу (бально-модифікована діаграма причин та наслідків,).
6. Пропоноване рішення (заходи та засоби спрямовані на зниження травматизму на виробництві та профзахворювання, рис. 4).
7. Графік виконання.
8. Графічні ілюстрації, що полегшують сприйняття інформації.
9. Дата та звітний підрозділ.

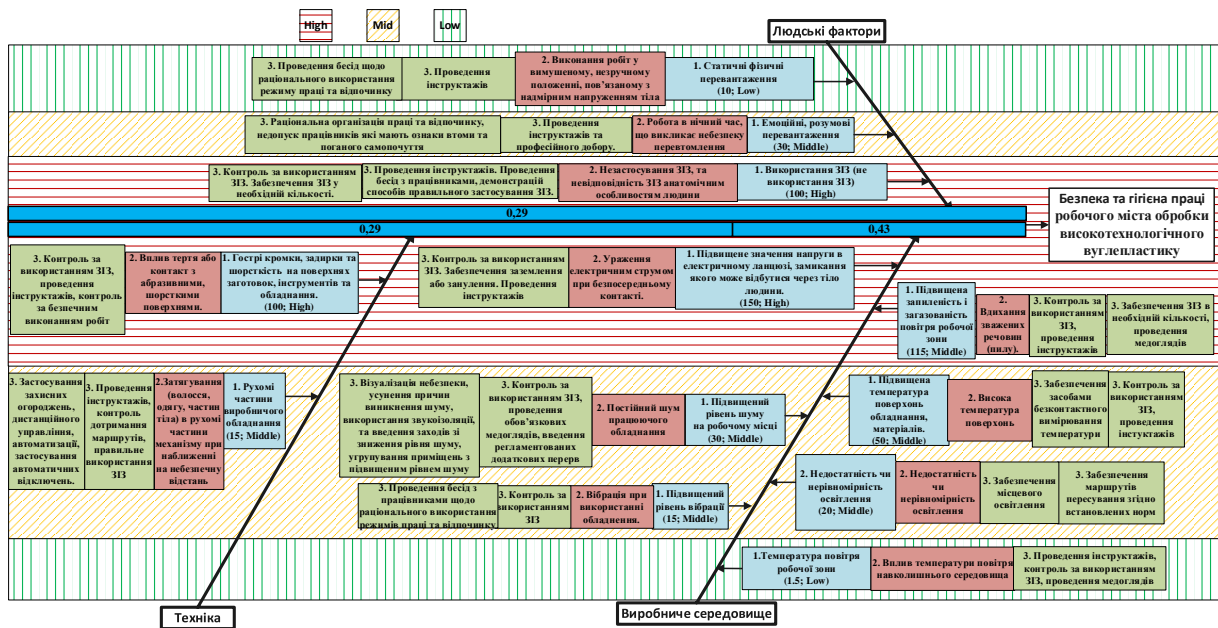


Рис. 4. Бально-модифікована діаграма Ісікави робочого місця обробки високотехнологічних композиційних матеріалів на основі вуглецевих волокон (1 - небезпечний та шкідливий чинник (категорія ризику), 2 - причина, 3 – рішення (заходи та засоби зниження ризику))

Висновки

Аналіз причинно-наслідкових взаємозв'язків (діаграма Ісікави) довів, що метод доцільно використовувати лише як частину аналізу першопричин, крім того поділ причин на основні категорії на початку аналізу не дає змогу адекватно враховувати взаємодії між категоріями. У зв'язку з цим запропоновано алгоритм побудови сучасної діаграми причин та наслідків, яка позбавлена зазначених недоліків.

Синтезована ієрархічна системна ball-modified Cause-effect diagram (бально-модифікована діаграма

Ісікави), що передбачає групування і ранжування чинників за значенням показника, який характеризує ступінь ризику виникнення досліджуваної проблеми, які впливають на безпеку працівників на відповідних робочих місцях (пріоритетного числа ризику).

Модифіковано діаграму на основі візуальної інформації, де наведено проблеми та виявленні причин, які впливають на безпеку праці та рекомендованими шляхами їх усунення, значною мірою спрощує впровадження управлінських рішень з охорони праці щодо зниження впливу небезпечних та шкідливих чинників.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Статистичний аналіз нещасних випадків та гострих професійних захворювань за 2022 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/971983>.
2. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. – Чинний від 2014-07-01. – Вид. офіц. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. – 80 с.
3. Schenkelberg F. An Introduction to the Cause and Effect Diagram [Електронний ресурс] / Fred Schenkelberg // Accendo Reliability. – Режим доступу: <https://accendoreliability.com/introduction-cause-effect-diagram/>
4. Пронюк Г. В. Сучасні підходи до управління безпекою праці / Г. В. Пронюк // Технологія-2018 : зб. наук. пр. XXI міжнарод. наук.-техн. конф., 20-21 квіт. 2018 р., Северодонецьк, 20–21 квіт. 2018 р. – Северодонецьк, 2018. – С. 195–197.

Received (Надійшла) 22.12.2022
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.02.2023

The principle of constructing a score-modified ishikawa diagram as a modern tool for risk analysis of mining and machining plants

Olga Chencheva, Serhii Sukach, Ivan Petrenko, Nataliia Karaeva

Abstract. Purpose. The principle of building a ball-modified Ishikawa diagram is proposed as a modern tool for risk analysis of mining and mechanical enterprises processing carbon composites. **Subject.** Justification of the application of management decisions on the organization of occupational health and safety measures to reduce the impact of dangerous and harmful factors by using systematized data in the proposed Score-modified Cause-effect Diagram (score-modified Ishikawa diagram), as well as the study of the problem of adaptive assessment of risks and hazards, which exists in current standards. It is proposed to use a method of solving the problem, by using a point-modified cause-and-effect diagram, as a modern risk analysis tool for planning and rationalizing labor protection measures at enterprises.

Keywords: risk analysis, ball-modified diagram, occupational disease, occupational safety.

Б. В. Бондаренко, Г. А. Кучук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ПРИ СПОВІЩЕННІ ПРО НАДЗВИЧАЙНУ СИТУАЦІЮ

Анотація. У статті розглянуто систему повідомлень про надзвичайні ситуації, яка може використовуватись для запобігання та реагування на різні надзвичайні ситуації. Розглянуто різноманітні види надзвичайних ситуацій, такі як природні катастрофи, техногенні аварії, кібератаки та терористичні акти, та обговорено важливість швидкої та ефективної реакції на них. Також розглянуто існуючі системи повідомлень та їх функції, а також варіативність архітектури та конфігурації елементів таких систем. На основі аналізу можна підсумувати, що ефективні системи повідомлень про надзвичайні ситуації повинні мати гнучку архітектуру, варіативність функцій та можуть мати різноманітну конфігурацію елементів задля забезпечення їх адаптації до різноманітних випадків застосування. Як висновок – визначена найкраща та найвідмовостійкіша система сповіщення про надзвичайні ситуації.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, система повідомлень, взаємодія компонентів, комп'ютерні системи, запобігання, Cell Broadcast, Mesh-мережі, архітектура, конфігурація, безпека.

Вступ

Дивлячись на шлях розвитку людства можна з подивом визначити, що інформація є одним з ключових його ресурсів, хоч і не таких очевидних як - матеріали чи винаходи.

Ще від зародження перших племен своєчасна комунікація та корисна практична інформація - мали вирішальне значення, адже за допомогою них невеликі групи наших пращурів кроманьйонців перемогли більших та численніших від себе неандертальців. Крізь тисячоліття змінювались форми, сенси та способи передачі інформації, але незмінним був сам концепт - змінювати видимий горизонт подій адресата, з певною метою. До слова буде не зайвим згадати про роздуми двох великих митців 20-го століття про світовий устрій майбутнього. Один з яких поміж іншим передбачав тотальний контроль за інформацією, а інший передрікав небезпеку саме у доступності та переповненості нею загального соціуму. По-своєму

були праві обидва, та все ж не можна забути про те що на сьогодні людство виробляє нескінченно велику кількість різноманітної і не рідко вторинної та фіктивної інформації.

Надзвичайні ситуації можуть траплятись у будь-якому місці та в будь-який час, і часто вони негативно впливають на людей та навколишнє середовище. Швидко та ефективно сповіщення про надзвичайну ситуацію може допомогти зменшити шкоду, запобігти катастрофі, або зберегти життя людей [1–4].

Мета статті – розглянути метод взаємодії компонентів комп'ютерних систем при сповіщенні про надзвичайну ситуацію.

Виклад основного матеріалу

Види надзвичайних ситуацій. Існує безліч різних видів надзвичайних ситуацій (рис. 1), оскільки вони можуть бути спричинені багатьма різними причинами [5, 6]. Однією з основних класифікацій є поділ на природні та штучні надзвичайні ситуації.



Рис. 1. Класифікація надзвичайних ситуацій

Природні надзвичайні ситуації включають, наприклад:

– стихійні лиха, такі як землетруси, торнадо, урагани, повені, цунамі та інші природні катаклізми;

– екологічні кризи, такі як забруднення повітря та води, лісові пожежі, зриви землі, викиди небезпечних речовин та інші негативні впливи на довкілля.

Штучні надзвичайні ситуації можуть виникнути з різних причин, таких як:

- техногенні аварії, наприклад, вибухи на заводах або пожежі на територіях промислових об'єктів;
- катастрофи, пов'язані з транспортом, наприклад, зіткнення літаків, потоплення кораблів або зіткнення автомобілів;
- терористичні акти та злочини, такі як напади на цивільних, вибухи бомб, злочинні вчинки на публічних заходах та інші.

Крім того, надзвичайні ситуації можуть відбуватися на різних рівнях, від індивідуальних подій до глобальних криз, і можуть потребувати різного рівня реагування та координації.

Різновид телекомунікацій. Телекомунікація - це передача інформації на відстань за допомогою електронних та оптичних засобів. Цей процес може відбуватися на різних відстанях і з використанням різноманітних пристроїв [7]. Розглянемо один з різновидів телекомунікацій - мобільну телекомунікацію.

Мобільна телекомунікація - це технологія передачі голосової інформації та даних на відстань за допомогою мережі стільникових веж у мобільних пристроїв, таких як смартфони та планшети. Мобільні телефонні мережі були розроблені у 1970-х роках, і з того часу ця технологія стала все більш популярною та широко поширеною в усьому світі.

Однією з ключових особливостей мобільної телекомунікації є можливість забезпечення зв'язку з будь-якого місця з покриттям мережі. Мобільна телекомунікація використовує різноманітні технології, такі як GSM, CDMA, 3G, 4G, 5G. Кожна з цих технологій має свої переваги та недоліки та забезпечує різну швидкість передачі даних. З появою 5G, мобільна телекомунікація набуває нових можливостей та перспектив.

Телекомунікації охоплюють широкий спектр технологій та методів передачі та обміну інформацією на відстані між віддаленими точками зв'язку. У науковій літературі можна знайти наступні різновиди телекомунікацій:

Радіозв'язок. Це передача інформації за допомогою радіохвиль, що передаються з одного пристрою до іншого через проміжний канал зв'язку, наприклад, радіо або супутникові системи.

Телефонія. Це передача голосової інформації через телефонні лінії або мобільні телефонні мережі.

Комп'ютерні мережі. Це передача даних між комп'ютерами та іншими пристроями, підключеними до мережі, за допомогою різних протоколів та технологій, таких як Інтернет, Wi-Fi, Bluetooth тощо.

Супутникові комунікації. Це передача інформації за допомогою супутників, які обертаються навколо Землі та забезпечують покриття на великих відстанях та в віддалених регіонах.

Телевізійне та радіомовлення. Це передача інформації у вигляді звуку та зображень через радіо- або телевізійні мережі.

Оптичні мережі. Це передача даних за допомогою світла через волоконно-оптичні кабелі.

Радіолокація та радіонавігація. Це використання радіохвиль для визначення положення об'єктів на землі, в повітрі або на морі, а також для навігації та

визначення маршруту руху транспортних засобів, наприклад, автомобілів, літаків та суден.

Способи оповіщення людей про надзвичайні ситуації різного типу. Один із найбільш поширених способів оповіщення про надзвичайні ситуації - це використання систем електронного оповіщення, таких як мобільні додатки, електронні повідомлення, тощо. Ці системи дозволяють відправляти швидкі та точні повідомлення про надзвичайні ситуації безпосередньо на мобільні телефони користувачів, що дозволяє швидко розповсюджувати інформацію та отримати відповідні інструкції щодо дій в такій ситуації.

Іншим ефективним способом оповіщення про надзвичайні ситуації є використання телевізійних та радіомовних ефірних мереж. Ці мережі можуть бути використані для трансляції ефірних повідомлень про надзвичайні ситуації, які будуть доступні для перегляду та прослуховування людьми в області покриття ефірної мережі.

Для більш точного та ефективного оповіщення про надзвичайні ситуації також використовуються системи аварійного оповіщення, такі як система аварійного оповіщення (Emergency Alert System - EAS) в США, або системи інформування населення про надзвичайні ситуації на базі Cell Broadcast. Ці системи дозволяють відправляти автоматичні та надійні повідомлення про надзвичайні ситуації, які можуть стати загрозою для життя та здоров'я людей, на телевізори та радіоприймачі в зоні покриття системи. Такі системи можуть також використовуватись для оповіщення людей про погодні катастрофи, природні катастрофи та інші події, що можуть відбутися в конкретній зоні.

Крім того, існують спеціальні системи оповіщення про надзвичайні ситуації, які використовуються в школах, офісах, на об'єктах підвищеної небезпеки та інших місцях, де збирається багато людей. Ці системи можуть включати звукові сигнали, світлові сигнали та інші способи оповіщення, які дозволяють людям зрозуміти, що відбувається, та отримати необхідні інструкції.

Важливо зазначити, що кожен спосіб оповіщення про надзвичайні ситуації має свої переваги та недоліки, і їх вибір залежить від типу надзвичайної ситуації, її масштабу та інших факторів. Наприклад, системи електронного оповіщення можуть бути найшвидшим способом розповсюдження інформації, але вони можуть не працювати у випадку відключення електропостачання чи інтернету. Телевізійні та радіомовні ефірні мережі можуть бути доступні для більшої кількості людей, але вони можуть бути обмежені географічним покриттям.

У будь-якому випадку, важливо мати належну систему оповіщення про надзвичайні ситуації та навчити людей, як правильно реагувати на такі ситуації. Це допоможе зберегти життя та здоров'я людей, а також зменшити можливі наслідки надзвичайної ситуації. Крім того, важливо регулярно перевіряти роботу систем оповіщення та необхідно проводити навчання цивільних, щоб соціум був готовим до різних надзвичайних ситуацій. Для цього можна викорис-

товувати тренувальні вправи та тренувальні ситуації, щоб забезпечити ефективну реакцію в разі реальної надзвичайної ситуації.

Cell Broadcast [8]. Cell Broadcast (CB) є технологією масового сповіщення, яка дозволяє надсилати короткі повідомлення на мобільні телефони користувачів, які знаходяться в певній географічній зоні. Ця технологія була розроблена з метою покращення системи оповіщення про надзвичайні ситуації та зменшення часу реагування на події.

Перед введенням СВ технології, системи сповіщення про надзвичайні ситуації в основному використовували SMS-повідомлення або виклики до конкретних користувачів. Однак, обидві ці технології мали свої недоліки, зокрема високу затримку в надходженні повідомлень та відсутність можливості надіслати повідомлення тільки користувачам, які знаходяться в певній географічній зоні.

СВ технологія, з іншого боку, дозволяє надсилати повідомлення всім мобільним користувачам, які перебувають в заданій географічній зоні, незалежно від того, чи є вони користувачами мобільних операторів, та забезпечує доставку повідомлень протягом кількох секунд.

Одним з найбільш значущих прикладів використання СВ технології є система оповіщення про надзвичайні ситуації в Японії. Японська система СВ, яка називається "Aerea Mail", була розроблена в 2007 році і була використана під час катастрофи в Фукусімі в 2011 році.

У порівнянні з іншими технологіями масового сповіщення, СВ має декілька переваг. Окрім швидкості та можливості відправити повідомлень всім користувачам, які перебувають в заданій зоні, СВ також дозволяє надсилати повідомлення безпосередньо на мобільні телефони, що робить його більш ефективним та надійним способом оповіщення про надзвичайні ситуації.

Однак, СВ також має деякі недоліки. Зокрема, він залежить від наявності покриття мобільної мережі в заданій географічній зоні та може бути обмежений кількістю повідомлень, які можна надіслати за раз. Крім того, є ризик спаму та надсилання непотрібної інформації, що може призвести до ігнорування повідомлень користувачами.

Системи сповіщення про надзвичайні ситуації різних країн. У США є національна система екстреного оповіщення (National Emergency Alert System).

Вона дозволяє відправляти повідомлення про надзвичайні ситуації на телебачення та радіо у всіх штатах (Приклад узятий з журналу «Latency and geofence testing of wireless emergency alerts intended for the ShakeAlert® earthquake early warning system for the West Coast of the United States of America» за доступом до ресурсу <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753522002375>, рис. 2).

Ця система використовується для оповіщення населення про такі події, як природні катастрофи, терористичні атаки та інші загрози безпеці. У деяких штатах, таких як Каліфорнія, також існують системи оповіщення через мобільний зв'язок, що дозволяє

відправляти повідомлення про надзвичайні ситуації на телефони всіх підключених користувачів.



Рис. 2. Приклад повідомлення National Emergency Alert System

Канада має система оповіщення про надзвичайні ситуації, яка називається Alert Ready. Ця система також передбачає використання телебачення та радіо для відправлення повідомлень про надзвичайні ситуації, а ще можливість оповіщення через мобільний зв'язок та Інтернет. Крім того, в Канаді існує система сповіщення про загрозу терористичних актів (National Public Alerting System), яка дозволяє відправляти повідомлення про потенційну загрозу терористичних актів на телефони та інші пристрої підключених користувачів.

Японія розробила систему оповіщення про надзвичайні ситуації, яка називається J-Alert. Ця система дозволяє оповіщати населення про небезпечні ситуації, такі як землетруси, цунамі, виверження вулканів, тощо. Оповіщення можуть надходити через мобільний зв'язок, телебачення та радіо. Крім того, в Японії існує спеціальна система оповіщення про ядерну небезпеку, яка дозволяє відправляти повідомлення про можливу радіаційну небезпеку на телефони та інші пристрої підключених користувачів.

У Ізраїлі є система оповіщення про ракетні загрози, яка називається Iron Dome. Ця система дозволяє виявляти ракетні атаки та відправляти повідомлення на мобільні телефони та інші пристрої про можливу небезпеку та необхідність захисту. Крім того, в Ізраїлі існує система оповіщення про надзвичайні ситуації, яка називається Home Front Command, яка дозволяє надсилати повідомлення на мобільні телефони та інші пристрої про можливі небезпеки та інструкції щодо дій у разі надзвичайних ситуацій.

Очевидно що запровадження подібних заходів врятували не одну сотню людських життів.

Меш мережі та їх переваги. Mesh-мережа є технологією, що передбачає побудову мережі без центральної точки доступу до Інтернету або не маючи "головного" вузла. Вона передбачає, що кожен вузол мережі може бути використаний як маршрутизатор для передачі даних між іншими точками мережі. Таким чином, мережа створюється шляхом сполучення вузлів, які забезпечують передачу даних від одного вузла до іншого, забезпечуючи маршрутизацію на рівні протоколу.

Найпоширенішим прикладом Mesh-мереж є Wi-Fi мережі, які можуть бути використані для створення Mesh-мережі. Інші приклади включають мережі сенсорів та мережі зв'язку для військових додатків.

В основному, Mesh-мережі використовуються в тих випадках, коли наявність центральної точки доступу до мережі є неможливою або необхідна більш висока стійкість до перебоїв.

Однією з головних переваг Mesh-мереж є те, що вони забезпечують більш високу стійкість до перебоїв. Оскільки вузли мережі можуть бути використані для передачі даних між іншими вузлами, мережа може продовжувати працювати навіть у випадку відмови одного або кількох вузлів. Більше того, Mesh-мережі можуть бути більш легкими та менш дорогими для встановлення, оскільки вони не потребують центральної точки доступу до мережі.

Mesh-мережі також можуть бути корисними в тих випадках, коли необхідна мобільність. Наприклад, у випадку війни або катастрофи, Mesh-мережі можуть бути використані для забезпечення зв'язку між різними військовими підрозділами або для організації зв'язку між пошкодженими районами та рятувальними службами. У цих випадках, Mesh-мережі можуть бути швидко встановлені, оскільки вони не потребують наявності інфраструктури, і можуть бути більш ефективними в забезпеченні зв'язку.

Поєднання технології Cell Broadcast та Mesh мереж за для максимізації поінформованості населення та функціонуванні системи у надзвичайних умовах. Головним недоліком системи географічного повідомлення Cell Broadcast є її безпорадність за умов виходу з ладу одної або декількох сітльникових веж під час надзвичайних ситуацій.

Саме для цього можуть бути використані усі телефони людей у області лиха для встановлення меш

мережі, яка допоможе постраждалим комунікувати між собою та рятувальниками або поліцією, під час надзвичайних ситуацій. Кликати на допомогу та сигналізувати про своє місцезнаходження навіть під завалами.

Можливий подальший розвиток технології у багатошарову систему безпеки. Наступний розвиток технології порятунку може бути виконаний через співпрацю державного Міністерства цифрової трансформації України, більшості операторів стільникової мережі (що вже було протестовано державною службою України з надзвичайних ситуацій) та поєднано у єдиний мобільний додаток що заздалегідь має вбудовані інструкції поведіння у різних надзвичайних ситуаціях та мапою безпосередньо найближчих місць сховку.

Та не менш важливе – має щоденні коефіцієнти можливості тих чи інших природних та техногенних лих на базі синоптичного обґрунтування та показників з об'єктів підвищеної небезпеки.

Висновки

У статті проаналізовано особливості функціонування систем оповіщення про надзвичайні ситуації та сторони можливого їх покращення.

Проаналізовано існуючі системи поза межами та усередині країни.

Проаналізовано методи підвищення ефективності функціонування цих систем.

Зроблено висновок, що виникла необхідність у створенні методів забезпечення населення за допомогою більш розвиненої та досконалої версії системи реагування на надзвичайні ситуації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрієнко М. В., Дячкова О. М., Борисов А. В., Соколенко О. І. Інформаційна система державного оповіщення при виникненні надзвичайних ситуацій в Україні. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2019. № 5. URL: http://www.dy.nayka.com.ua/pdf/5_2019/5.pdf.
2. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту: Постанова Кабінету Міністрів від 9 січня 2014 р. № 11. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF>.
3. Положення про організацію оповіщення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайних ситуацій та зв'язку у сфері цивільного захисту. 2017 р. № 733. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/733-2017-%D0%BF#n9>.
4. Кодекс цивільного захисту України: закон від 02 жовтня 2012 р. № 5403-VI // Відомості Верховної Ради України. 2013. № 34-35. Ст. 458. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#n140>.
5. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: <https://www.uzhnu.edu.ua/en/infocentre/get/732>.
6. Офіційний сайт Державної служби України з надзвичайних ситуацій. URL: <https://dsns.gov.ua/>.
7. Воробієнко П. П., Нікітюк Л. А., Резніченко П. І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі : Підручник [для вищих навчальних закладів]. К.: САММІТ-Книга, 2010. 708 с. URL: https://www.dut.edu.ua/uploads/1_472_12078122.pdf.
8. Cel@lert (2005) Cell broadcasting. URL: http://www.cell-alert.co.uk/cell_broadcasting.html.

Received (Надійшла) 22.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.03.2023

Method of interaction of computer systems components during emergency notification

Bohdan Bondarenko, Heorhii Kuchuk

Abstract. The article discusses the emergency notification system, which can be used to anticipate and respond to various emergency situations. Various types of emergencies, such as natural disasters, man-made accidents, cyber-attacks and acts of terrorism, are considered and the importance of a quick and effective response to them is discussed. The existing message systems and their functions, as well as the variability of the architecture and configuration of the elements of such systems are also considered. Based on the analysis, it can be concluded that effective emergency notification systems should have flexible architecture, variability of functions and configuration of elements to ensure their adaptation to various application cases. As a conclusion, the best and most fault-tolerant emergency notification system has been determined.

Keywords: emergency situation, message system, interaction of components, computer systems, prevention, cell broadcast, mesh- networking, architecture, configuration, security.

В. М. Почерняєв¹, М. С. Магомедова², Н. М. Сивкова¹

¹ Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна

² Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна

КОМУТАЦІЙНИЙ ФАЗООБЕРТАЧ НА ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНОМУ ДІЕЛЕКТРИКОМ ПРЯМОКУТНОМУ ХВИЛЕВОДІ

Анотація. У статті розроблені конструкції комутаційних фазообертачів на частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводах відбиваючого та прохідного типів. У роботі представлено еквівалентну схему резонансної діафрагми з включеною відкритою нелінійною структурою. Досліджено конструкцію комутаційного фазообертача відбиваючого типу з трьома резонансними діафрагмами з відкритою нелінійною структурою. Наведено співвідношення, що зв'язує кількість резонансних діафрагм із стрибками фази. Розраховано ступінчасте зчленування двох частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводів. Вибрані співвідношення розмірів частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводів дозволяють одержати одномодові режими обох хвилеводів у широкому діапазоні хвиль. Наведено співвідношення нормованих провідностей резонансної діафрагми з її геометричними розмірами. Знайдено вираз для нормованої провідності діафрагми поблизу резонансу, як частотна функція розналаштування. В роботі досліджено конструкцію комутаційного фазообертача прохідного типу на щільному мості реалізованого на частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводах. Зазначено, що досліджуваний відбиваючий комутаційний фазообертач може бути використаний, як самостійний пристрій або як вузол у комутаційному фазообертачі прохідного типу з роздільними входом і виходом. Комутаційний фазообертач прохідного типу складається з щільного мосту на частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводах, кожен канал якого представляє відбиваючий фазообертач. У роботі дослідження щільного мосту проводиться комбінованим методом, що поєднує теорію електричних ланцюгів з розподіленими параметрами з розв'язанням електродинамічної задачі. Теорія електричних ланцюгів з розподіленими параметрами дає можливість спростити електродинамічну задачу розрахунку щільного мосту на частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводах і дозволяє провести аналіз та синтез пристрою. Розраховані частотні залежності щільного мосту щодо різних значень середньої частоти. Наведено порівняльний аналіз електричних параметрів комутаційного фазообертача відбиваючого і прохідного типів, як наприклад, коефіцієнт бігучої хвилі і фаза коефіцієнта передачі. Для щільного мосту на частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводах досліджено та наведено розрахункові залежності перехідного ослаблення між електрично ізольованими плечима і коефіцієнти передачі між електрично зв'язаними плечима. Зазначені параметри наведені для середньої частоти робочого діапазону залежно від відношення a/λ_0 .

Ключові слова: комутаційний фазообертач відбиваючого типу, комутаційний фазообертач прохідного типу, частково заповнений діелектриком прямокутний хвилевід, відкрита нелінійна структура, щільний міст, діафрагма.

Вступ

Комутаційні фазообертачі застосовуються в різних типах фазових антенних решіток (ФАР). Скануючі, активні та адаптивні ФАР і їх різновиди використовуються в радіолокаційній техніці наземного та морського базування та можуть застосовуватися в комбінованих телекомунікаційних системах НВЧ діапазону [1,2]. Вимога високої електричної міцності таких фазообертачів може бути забезпечена їх реалізацією на частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводах (ЧЗДПХ).

Аналіз літературних джерел. Сучасний розвиток ФАР різного застосування йде шляхом удосконалення діаграмоутворюючих схем, у складі яких застосовуються комутаційні фазообертачі. В роботі [3] показано застосування таких ФАР в авіаційній техніці, а в роботі [4] - для малогабаритних літальних апаратів. У роботі [5] досліджено ширококутне сканування, що досягається за допомогою ФАР у Ku -діапазоні для супутникового зв'язку. При цьому використовується різновид комутаційних фазообертачів. У роботі [6] розглянуто ФАР для діапазону 26 ГГц зі зміною кута випромінювання основної пелюстки діаграми спрямованості з використанням комутаційної схеми. У роботі

[7] показано розширення діапазону сканування ФАР за такою самою схемою.

Метою роботи є розробка конструкцій комутаційних фазообертачів на ЧЗДПХ відбиваючого та прохідного типів.

Основна частина

Керуючим елементом комутаційного фазообертача є p - i - n -діод у вигляді відкритої нелінійної структури (ВНС), включеної в резонансну діафрагму. На рис.1 показана резонансна діафрагма з включеною ВНС. У знеструмленому стані щілина резонансної діафрагми пропускає електромагнітну енергію, тобто являється незамкнутою. При протіканні струму через ВНС електромагнітні хвилі відбиваються і така щілина являється замкнутою. Струм управління становить десятки ... сотні мА, розмір щілини резонансної діафрагми $\sim a' \times d$. На рис.1а позначено: a, b – широка та вузька стінки прямокутного хвилеводу; c, d – поперечні розміри ВНС, які збігаються з поперечними розмірами діелектричної пластини.

На рис. 1, б показано еквівалентну схему резонансної діафрагми з включеною ВНС, де:

Y_d – нормована хвильова провідність ЧЗДПХ;
 \hat{y} – нормована хвильова провідність з ВНС.

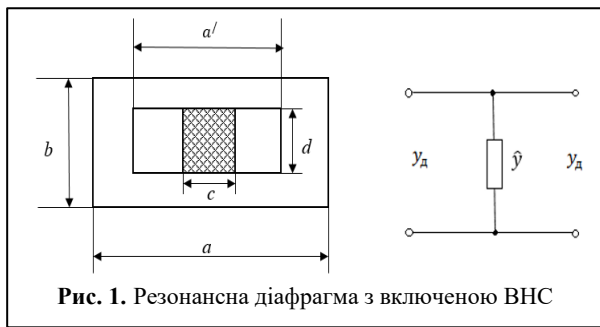


Рис. 1. Резонансна діафрагма з включеною ВНС

На рис. 2, а показаний загальний вигляд комутаційного фазообертача відбиваючого типу з трьома резонансними діафрагмами з ВНС, на рис. 2, б показаний вид зверху цього комутаційного фазообертача.

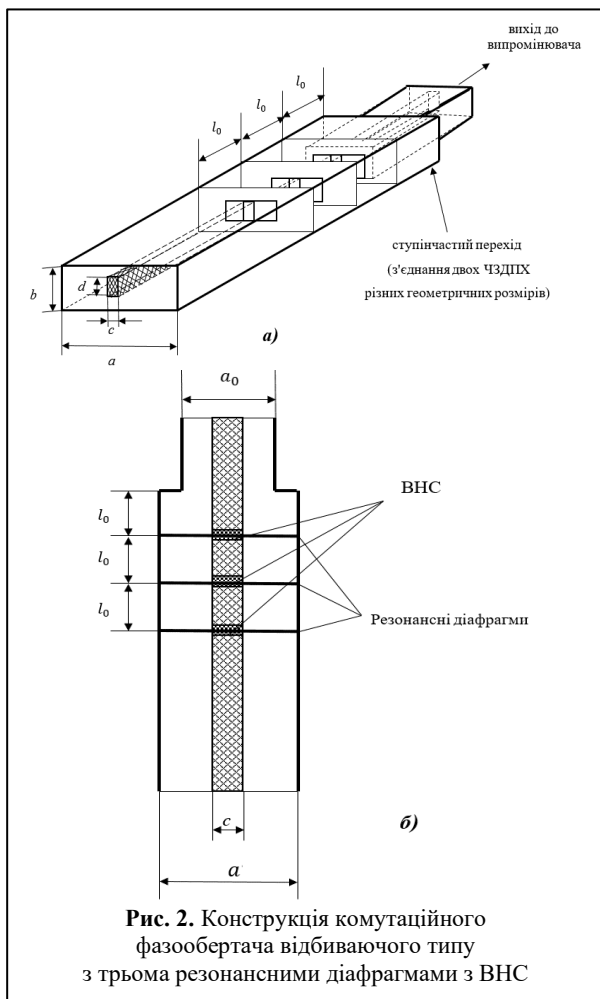


Рис. 2. Конструкція комутаційного фазообертача відбиваючого типу з трьома резонансними діафрагмами з ВНС

Кількість резонансних діафрагм m пов'язано з величиною стрибка фази $\Delta\varphi$ співвідношенням:

$$m = \frac{2\pi}{\Delta\varphi} - 1. \tag{1}$$

Якщо необхідно мати $\Delta\varphi = \pi/2$, то це можна забезпечити трьома резонансними діафрагмами з ВНС, розташованими на відстані $l_0 \sim \Lambda/4$ один від одного, де Λ – хвилеводна довжина основної хвилі ЧЗДПХ [8]. Комутований елемент є резонансною діафрагмою з включеною ВНС (рис. 1, а). Падаюча основна хвиля ЧЗДПХ відбивається від однієї з

діафрагм, замкненої струмом, що протікає через ВНС. Інші ВНС в інших діафрагмах знеструмлені. Якщо пропустити струм через наступну ВНС, а інші ВНС знеструмити, то фаза відбитої хвилі на відкритому кінці відрізка ЧЗДПХ зміниться, оскільки зміниться довжина шляху для основної хвилі ЧЗДПХ. Якщо необхідний фазообертач зі стрибком фази на π , то згідно з (1) це можна забезпечити реалізацією одного комутowanego елемента у фазообертачі.

Зазначимо, що до параметрів електрично керованого фазообертача висуваються такі вимоги:

- 1) потужність вихідного сигналу повинна змінюватися при перебудові фазообертача;
- 2) зміна фази вихідного сигналу при перебудові фазообертача має бути якомога більшою;
- 3) втрати потужності у фазообертачі повинні бути, як можна меншими.

У загальному випадку такий фазообертач являє собою пасивний НВЧ пристрій, що містить нелінійний опір і навантажує довільну лінію передачі з єдиним типом хвилі, що поширюється. При цьому обмеження фазообертача може бути зображено еквівалентною схемою, як на рис. 1, б.

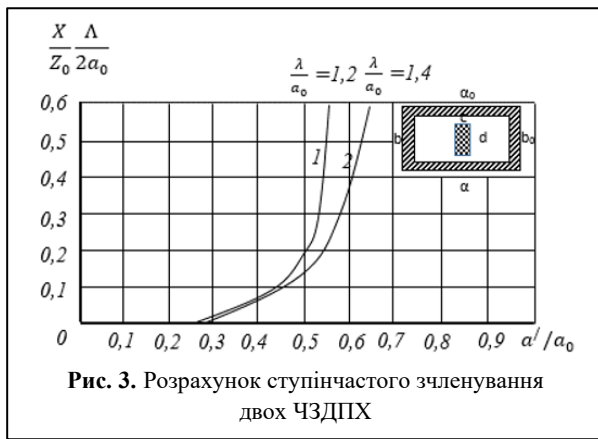
Зазначимо, що в діапазоні НВЧ застосовуються чотирьохполюсники з розподіленими параметрами. Аналіз ланцюгів з розподіленими параметрами дозволяє отримати для максимального за абсолютною величиною зсуву фази вираз:

$$\frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} tg \frac{\Delta\varphi}{4} \leq \Phi, \tag{2}$$

де $|\Gamma|$ – модуль коефіцієнта відбиття, $\Gamma = \frac{Z_{вх} - Z_0}{Z_{вх} + Z_0}$, Z_0 – хвильовий опір лінії передачі; Φ – функція, що характеризує фазоутворювальну здатність керованого елемента.

Формула (2) визначає гранично допустимі значення параметрів $|\Gamma|$ та $|\Delta\varphi|$ фазообертача. З формули (2) слід зазначити, що ці параметри пов'язані з зворотною залежністю, тобто одне їх може бути збільшено лише рахунок зменшення іншого. Величина Φ , характеризує фазоутворюючу здатність керованого елемента та являється величиною «якості» даного елемента. Як впливає з (2), досягнуті параметри фазообертача залежать тільки від властивостей керованого елемента, але не залежать від хвильового опору лінії передачі, навантаженням якої є фазообертач. Однак, використання ВНС у резонансній діафрагмі, що включена до ЧЗДПХ, дозволяє розширити гранично допустимі значення $|\Gamma|$ та $|\Delta\varphi|$. Тим більше, що використання ЧЗДПХ для регулювання (підналаштування) різних параметрів набагато гнучкіше, ніж «гра» з товщиною загальної стінки щілинного мосту, як пропонується у роботі [9].

Розрахунок ступінчастого зчленування двох ЧЗДПХ представлений на рис. 3, де X – реактивний опір плоско-поперечного стику двох ЧЗДПХ; Z_0 – хвильовий опір ЧЗДПХ розмірами $a \times b$; Z'_0, Λ'_0 – хвильовий опір та довжина хвилі ЧЗДПХ розмірами $a_0 \times b_0$. На рис. 3 крива 1 побудована для $\frac{\lambda}{a_0} = 1,2$, а крива 2 – $\frac{\lambda}{a_0} = 1,4$.



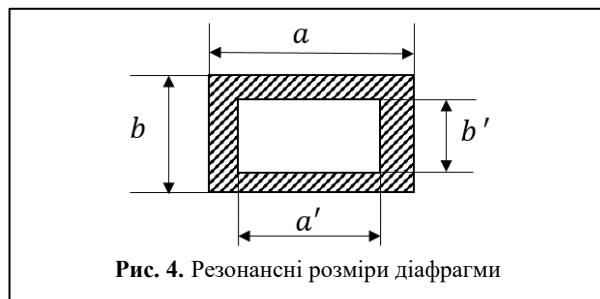
Вибрані співвідношення розмірів ЧЗДПХ дозволяють отримати одномодові режими роботи обох хвильоводів у широкому діапазоні хвиль. Докладніше розрахунок ступінчастих переходів на ЧЗДПХ викладено у роботі [8].

Геометричні та частотні співвідношення для розрахунку обрані так, що в широкому хвильоводі $a \times b$ може поширюватися основна хвиля квазі- H_{10} і у вузькому хвильоводі $a_0 \times b_0$ одна хвиля квазі- H_{10} , що розповсюджується.

Нормована реактивна провідність поблизу резонансу визначається за формулою:

$$\hat{b} = \hat{b}_{c0} \left(\frac{A_0}{\lambda} - \frac{\lambda}{A_0} \right), \quad (3)$$

де \hat{b}_{c0} - ємнісна провідність, яка обчислюється так, начебто $a' = a$ для резонансної довжини хвилі λ_0 .



Резонансні розміри діафрагми (рис. 4) визначаються із співвідношення:

$$\frac{a}{b} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2} = \frac{a'}{b'} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a'} \right)^2}. \quad (4)$$

Знайдемо провідність діафрагми поблизу резонансу, як функцію частотного рознаштування:

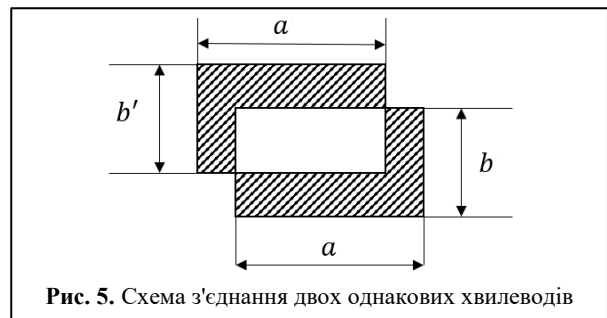
$$\hat{b} = \frac{d\hat{b}}{d\lambda} \Big|_0 \Delta\lambda = \frac{d\hat{b}}{d\lambda} \Big|_0 \cdot \frac{d\lambda}{d\lambda_0} \Delta\lambda_0.$$

З (3) маємо: $\frac{d\hat{b}}{d\lambda} = \hat{b}_{c0} \left(-\frac{A_0}{\lambda^2} - \frac{1}{A_0} \right)_0 = -\hat{b}_{c0} \frac{2}{A_0}$. Далі знаходимо:

$$\frac{d\hat{b}}{d\lambda} \Big|_0 = \frac{1}{\left[\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2} \right]^3} = \left(\frac{A_0}{\lambda_0} \right)^3. \quad (5)$$

Отже, з формули (5) маємо:

$$\hat{b} = \hat{b}_{c0} \left(\frac{A_0}{\lambda_0} \right)^2 \left(-\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} \right). \quad (6)$$



Еквівалентні схеми, подібні до діафрагм, мають з'єднання абсолютно однакових хвильоводів, в яких одна частина зміщена щодо іншої (рис.5). Зсуви, як і діафрагми, можуть мати ємнісний, індуктивний та резонансний характер і використовуються замість діафрагм, особливо у міліметровому діапазоні хвиль. Але вони можуть виникати і мимоволі при поєднанні окремих секцій хвильоводів до загального антено-фідерного тракту. Такі зміщені з'єднання на ЧЗДПХ досліджено у роботі [8].

Досліджуваний відбиваючий комутаційний фазообертач може бути використаний, як самостійний пристрій або, як вузол в комутаційному фазообертачі прохідного типу з роздільними входом і виходом. Комутаційний фазообертач прохідного типу складається з щільного мосту на ЧЗДПХ, кожен канал якого представляє відбиваючий фазообертач (рис. 2). Загальний вигляд конструкції такого комутаційного фазообертача представлений на рис. 6, а, а вид зверху – на рис.6, б. На рис. 6 показані роздільні вхід та вихід такого фазообертача. У разі розташування резонансних діафрагм з ВНС на рівних відстанях l_0 один від одного найменша величина стрибка фази визначається за формулою:

$$\Delta\varphi = 2K\beta l_0,$$

де l_0 – відстань між діафрагмами; β – фазова постійна ЧЗДПХ [8]; K – параметр «якості» ВНС. Величина K визначається наступним чином:

$$K = \frac{y'_{min}}{y'_{max}},$$

де y' – активна частина провідності \hat{y} , яка під впливом керуючого напруження змінюється від y'_{min} до y'_{max} . Зазначимо, що до особливостей розрахунку комутаційного фазообертача прохідного типу, на відміну від комутаційного фазообертача відбиваючого типу, відноситься облік особливостей розрахунку щільного мосту на ЧЗДПХ.

Відомо, що хвильоводний щільний міст набув у техніці НВЧ широкого поширення. Проте на сьогодні відсутні інженерні методи аналізу та синтезу щільного мосту на ЧЗДПХ.

У цій роботі дослідження мосту проводиться комбінованим методом, що поєднує теорію електричних ланцюгів із розв'язанням електродинамічної задачі. Теорія електричних ланцюгів дає можливість спростити електродинамічну задачу розрахунку щільного мосту на ЧЗДПХ та дозволяє провести аналіз та синтез пристрою.

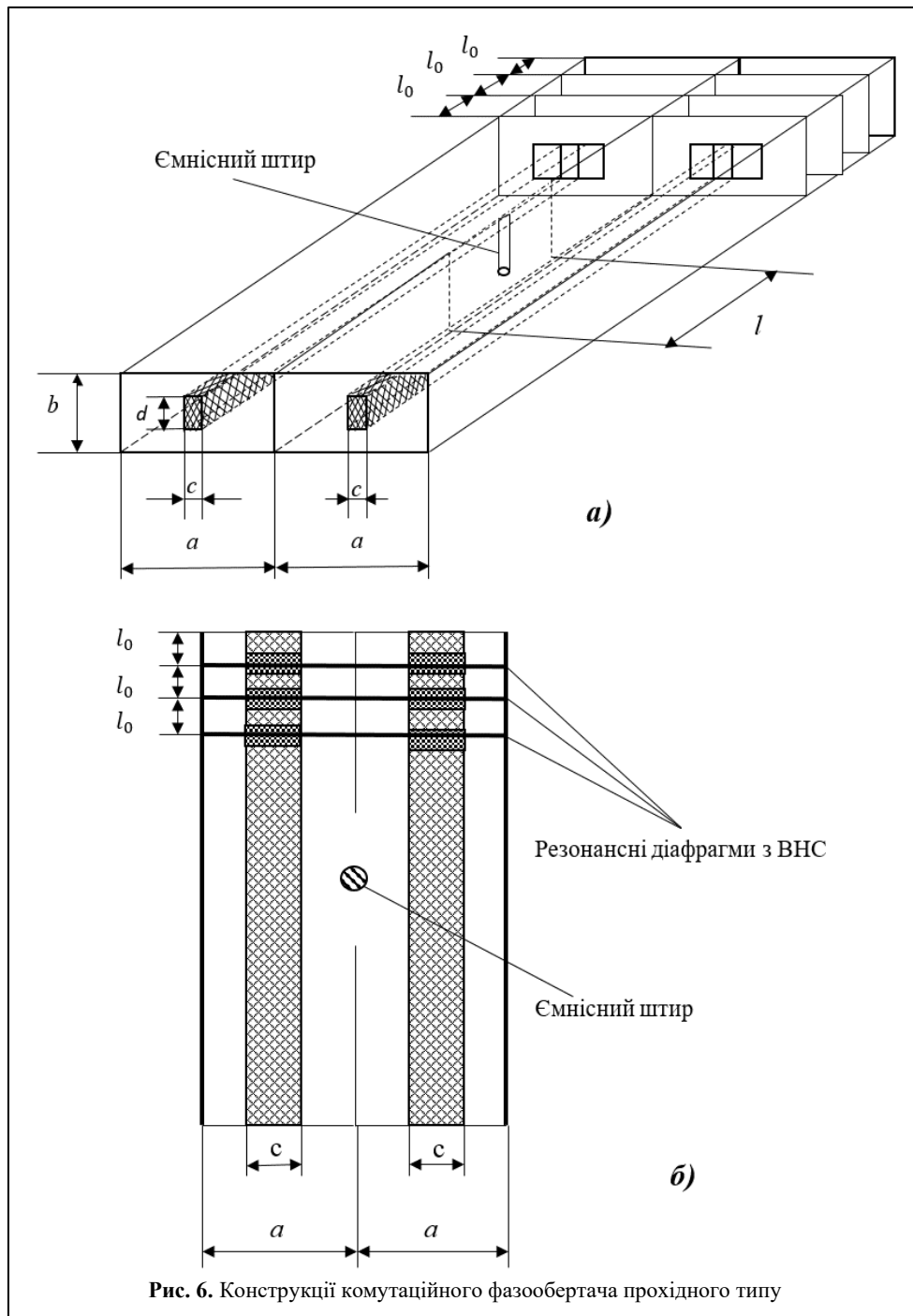


Рис. 6. Конструкції комутаційного фазообертача прохідного типу

Щілинний міст на ЧЗДПХ являє собою пристрій, утворений двома ЧЗДПХ у загальній вузькій стінці яких знаходиться вікно зв'язку. Вихідні хвилеводи, що мають ширину і допускають поширення тільки основної хвилі квазі- H_{10} , характеризуються хвильовим опором Z_1 , а також довжиною хвилі в хвилеводі Λ_1 . Вікно зв'язку утворює загальний хвилевод шириною $2a$, в якому поряд із хвилею квазі- H_{10} може поширюватися хвиля квазі- H_{20} . Хвильовий опір цього хвилеводу для хвилі квазі- H_{10} дорівнює Z'_1 , а хвилі квазі- H_{20} – $Z_2 = Z_1/2$.

Довжини хвиль у хвилеводі відповідно рівні:

$$\Lambda_1 = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\text{кр}H_{10}})^2},$$

$$\Lambda_2 = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\text{кр}H_{20}})^2},$$

де $\lambda_{\text{кр}H_{10}}$, $\lambda_{\text{кр}H_{20}}$ – критичні довжини хвиль квазі- H_{10} та квазі- H_{20} відповідно.

Залежно від способу узгодження у загальному хвилеводі розміщуються різні реактивні узгоджувальні елементи у вигляді ємнісних або індуктивних штирів, провідність яких дорівнює jB . При збудженні щілинного моста з боку плеча 1 у загальному хвилеводі, поряд з хвилею квазі- H_{10} виникає хвиля квазі- H_{20} . Зважаючи на наявність узгоджувальних елементів, відбивання у плечі 1 не виникають, і тому потужності, що переносяться кожною хвилею, виявляються однаковими. У перерізі загального хвиле-

воду, що примикає до хвильоводу плеча 1, електричні поля хвиль квазі- H_{10} та квазі- H_{20} мають однакові фази, а в перерізі, що примикає до хвильоводу плеча 2 - знаходяться у протифазі. Тому плече 2 не збуджується і виявляється електрично розв'язаним від плеча 1. Аналогічно, плечі 3 і 4 також виявляються електрично розв'язаними.

Хвилі квазі- H_{10} та квазі- H_{20} поширюються у загальному хвильоводі з різними фазовими швидкостями і збуджують у хвильоводах плечей 3 і 4 електричні поля, однакові за амплітудою, фазовий кут між якими визначається зсувом фаз між хвилями квазі- H_{10} та квазі- H_{20} на виході загального хвильоводу, тобто довжиною загального хвильоводу. Якщо цю довжину вибрати таким чином (з урахуванням впливу узгоджувальних елементів), щоб різниця фаз між полями складала $\pm 90^\circ$, то результуючі поля хвильоводів плечей 3 і 4 виявляються однаковими. Вибираючи належним чином величину різниці фаз між полями, можемо отримати міст із будь-яким за величиною коефіцієнтом розподілу.

Коефіцієнт розподілу мосту k_0 на середній частоті f_0 визначається формулою (7):

$$k_0 = P_4/P_3 = tg^2[(\varphi_1 - \varphi_2)/2], \quad (7)$$

де P_3 та P_4 - потужності, що виникли в плечах 3 і 4 при збудженні щілинного моста з боку плеча 1; φ_1 - фазовий кут i -го свого значення матриці розсіювання мосту.

Баланс моста здійснюється за допомогою одного реактивного елемента, розташованого в центрі загального широкого хвильоводу.

Наближена формула визначення на середній частоті нормованої величини реактивної провідності узгоджувального елемента, що забезпечує баланс моста, записується в наступному вигляді:

$$b = -\frac{2k(k^2 - 4)tg \frac{\pi l}{\Lambda_1}}{k^2 + 4tg^2 \frac{\pi l}{\Lambda_1}}. \quad (8)$$

де $b = B/Y_1$, $Y_1 = 1/Z_1$, $k = Z_2/Z_1$, l - довжина отвору зв'язку.

Довжина отвору зв'язку знаходиться як

$$l = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\Lambda_1} - \frac{1}{\Lambda_2} \right)^{-1}.$$

За допомогою узгоджувального елемента можна отримати баланс щілинного мосту для будь-якої довжини l загального хвильоводу. Провідність узгоджувального елемента має індуктивний характер при $0 < \theta_1 < \frac{\pi}{2}$ і ємнісний при $\frac{\pi}{2} < \theta_1 < \pi$. Розмір θ_1 визначається так:

$$\theta_1 = \frac{2\pi l}{\Lambda_1}.$$

Зокрема, коли $\theta_1 = \pi/2$, то $b = 0$.

Електричні параметри комутаційних фазообертачів, і зокрема щілинного мосту, знаходимо за формулами:

а) коефіцієнт бігучої хвилі на вхідному плечі:

$$\text{КБХ} = (1 - |\Gamma|)/(1 + |\Gamma|),$$

б) перехідне ослаблення між електрично ізолюваними плечима:

$$|C|^2 = 10 \lg \frac{1}{|C|^2},$$

в) коефіцієнти передачі між електрично зв'язаними плечима:

$$|D|^2 = 10 \lg \frac{1}{|D|^2},$$

г) фаза коефіцієнта передачі:

$$\varphi = \arg D.$$

При розрахунку частотна залежність ємнісного елемента приймається рівною $b = b_0(\Lambda^2/\lambda^2)$. Великою D позначений також коефіцієнт передачі комутаційного фазообертача відбиваючого типу.

Частотні залежності щілинного мосту розраховані до різних значень середньої частоти. Визначалася відносна смуга $2\Delta f/f_0$, в якій коефіцієнти передачі $|D|^2$ відрізнялися від номінального значення не більше, ніж на $\pm 0,5$ дБ. Далі були значення фази коефіцієнта передачі, перехідне ослаблення між електрично ізолюваними плечима $|C|^2$ та коефіцієнта бігучої хвилі (КБХ). Зазначені параметри на середній частоті залежно від a/λ_0 , наведені на рис.7, де криві 1 відносяться до фазообертача відбиваючого типу, а криві 2 - фазообертача прохідного типу.

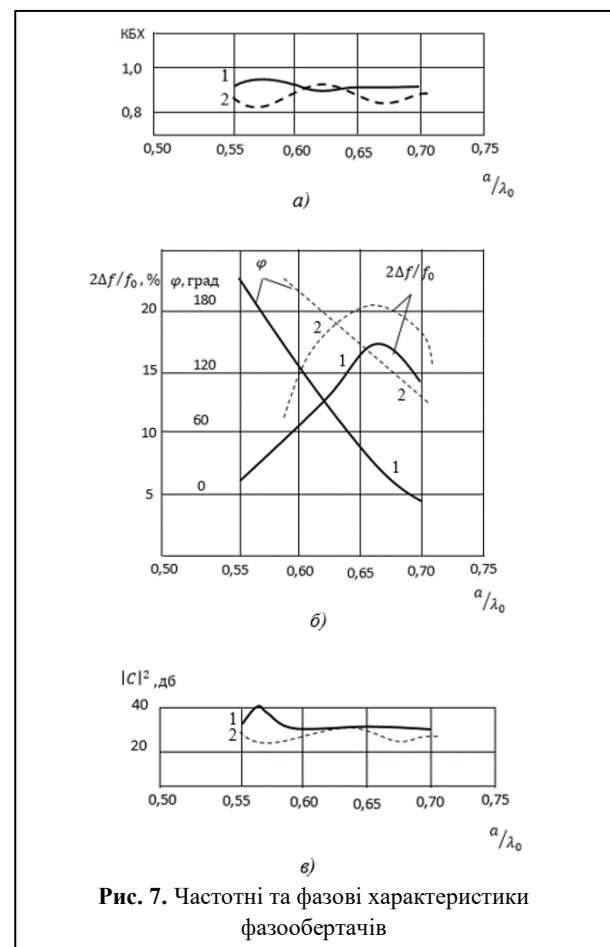


Рис. 7. Частотні та фазові характеристики фазообертачів

Порівнюючи відповідні криві, можна відзначити, що фазообертач прохідного типу на щільному мосту з узгоджувачем реактивним елементом в отворі зв'язку має більш високі частотні характеристики, ніж фазообертач відбиваючого типу.

Висновки

На закінчення відзначимо, що конструктивно фазообертач прохідного типу є більш складним

пристроєм, ніж фазообертач відбиваючого типу. Вибір конкретного типу комутаційного фазообертача на ЧЗДПХ здійснюється у процесі проектування конкретної конструкції ФАР.

У фазообертача прохідного типу на середній частоті швидше змінюються частотні характеристики зі зміною a/λ_0 в порівнянні з аналогічними характеристиками фазообертача відбиваючого типу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент №112217 Україна. С2. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція / Почерняєв В.М., Повхліб В.С.; заявл. 12.09.2014; опубл. 10.08.2016 // Бюл.№ 15.
2. Патент №120288 Україна. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція / Почерняєв В.М., Повхліб В.С., Зайченко В.В.; заявл. 29.08.2017; опубл. 11.11.2019 // Бюл.№ 21.
3. Sudhakar Rao. Phased Array Antennas For Aircraft Applications/ Sudhakar Rao, Ameesh Pandya, Calen Ostrout// IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP), 2018.
4. Sergei Maltsev. Technique for Tuning a Phased Array Antenna of Airborne Radars of Small-Sized Aircrafts /Sergei Maltsev, Mykola Shcherbakov, Oleh Voitovych, Ganna Veselovska-Maiboroda, Sergei Labazov, Anna Linkova//IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW),2020.
5. Kamil Yavuz Kapusuz. Low-profile scalable phased array antenna at Ku-band for mobile satellite communications/Kamil Yavuz Kapusuz, Yakup Şen, Metehan Bulut, İlter Karadede, Uğur Oğuz// IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST), 2016.
6. Y.C. Mark Tan. 64-Elements mmWave Detachable Phased Array Antenna for 5G 26GHz Band/Y.C. Mark Tan; NG Guan Hong// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 2020.
7. Enrico Tolin. Phase Shifters Design for Scan Range Extension of Rotman Lens Beamforming Based Antenna Arrays/ Enrico Tolin, Francesca Vipiana, Oliver Litschke, Simona Bruni// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2018.
8. Почерняєв В.М. Устройства на частично заполненных диэлектриком волноводах / В.М. Почерняєв. – Киев: УкрНИПСК, 2000. – 224с.
9. Лозяной В.И. Расчет фазовращателя на основе щелевого моста / Лозяной В.И., Прохода И.Г., Прудкий В.П., Рябчий В.Д. //Радиотехника, 1983, №2, С.95-96 (Изв. высш. учебн. заведений)

Received (Надійшла) 15.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.02.2023

A switching phase shifter on a rectangular waveguide partially filled by dielectric

V. Pochernyaev, M. Mahomedova, N. Syvkova

Annotation. In the article, designs of switching phase shifters of reflective and pass-through types based on rectangular waveguides partially filled by dielectric are developed. The paper presents an equivalent circuit of a resonant diaphragm with an open nonlinear structure included. The design of a reflective type switching phase shifter with three resonant diaphragms with an open nonlinear structure has been studied. A relation is given that connects the number of resonant diaphragms with phase jumps. A stepped junction of two rectangular waveguides partially filled by dielectric is calculated. The selected ratios of the dimensions of rectangular waveguides partially filled by dielectric make it possible to obtain single-mode operation of both waveguides in a wide range of waves. The ratios of the normalized conductivities of the resonant diaphragm with its geometric dimensions are given. An expression is found for the normalized conductivity of the diaphragm near the resonance as a function of the frequency detuning. In this article, the design of a switching phase shifter of the pass-through type on a slot bridge implemented on rectangular waveguides partially filled by dielectric is studied. It is noted that the studied reflective switching phase shifter can be used as an independent device or as a node in a switching phase shifter of the pass-through type with separate input and output. The switching phase shifter of the pass-through type consists of a slotted bridge on rectangular waveguides partially filled by dielectric, each channel of which is a reflective phase shifter. In this paper, the study of the slotted bridge is carried out by a combined method that combines the theory of electrical circuits with distributed parameters with the solution of an electrodynamic problem. The theory of electrical circuits with distributed parameters makes it possible to simplify the electrodynamic problem of calculating a slotted bridge on rectangular waveguides partially filled by dielectric and allows analysis and synthesis of the device. The frequency dependences of the slotted bridge are calculated for different values of the average frequency. A comparative analysis of the electrical parameters of the switching phase shifter of the reflective and through-type types, such as the coefficient of the traveling wave and the phase of the transmission coefficient is given. For a slotted bridge on rectangular waveguides partially filled with a dielectric, the calculated dependences of the transient attenuation between electrically isolated arms and the transfer coefficients between electrically connected arms are investigated and presented. The specified parameters are given for the average frequency of the operating range, depending on the ratio a/λ_0 .

Keywords: switching phase shifter of reflective type, switching phase shifter pass-through type, rectangular waveguide partially filled by dielectric, open nonlinear structure, slotted bridge, resonant diaphragm.

A. Serkov, V. Breslavets, Yu. Breslavets, I. Yakovenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION ON RESISTANCE OF SEMICONDUCTOR DEVICES

Abstract. The **subject matter** is the processes of analysis and mechanisms of appearance of instabilities of natural vibrations of semiconductor structures., due to their interaction with flows of charged particles under the influence of external electromagnetic radiation. It is shown that the influence of pulsed electromagnetic radiation is accompanied by the appearance of currents in the conductive elements of products that are capable of exciting natural oscillations of semiconductor components and are the cause of failures of radio products. The **aim** is to develop the theory of collisionless damping of surface polaritons in the classical approximation, as well as to study the mechanisms of collisionless damping of surface plasmons at the boundaries of semiconductor components of radio products under conditions when the temperature of carriers of conducting solids is much lower than the plasmon energy (quantum approximation). The **objectives** are: a kinetic equation describing the change in the number of surface plasmons as a result of their interaction with conduction electrons; obtaining its solution, which determine the decrement of oscillations and the power of spontaneous emission of particles. The **methods** used are: a method of successive approximations for solving the kinetic equations of the charged particle flux - semiconductor structure system within the framework of the quantum approach, when the interaction of waves and particles is in the nature of random collisions and is described by the method of secondary quantization of the system (representation of occupation numbers). The **following results** are obtained: Expressions are obtained for the decrements of surface plasmons in the presence of an infinitely high and infinitely small potential barrier at the interface between media. A kinetic equation is obtained that describes the change in the number surface plasmons as a result of their interaction with conduction electrons; his decisions are given, which determine oscillation decrement. Expressions are obtained for the decrements of surface plasmons at presence of infinitely high and infinitely small potential barrier at the interface between A physical model of the occurrence of reversible failures (effects induced by electromagnetic radiation currents per volt - ampere characteristics of semiconductor devices). The ranges of parameters of the external electromagnetic radiation at which this physical model is realized. **Conclusion.** Calculated relations are obtained that relate the parameters of semi-conductor structures: the concentration of free carriers, permittivity, carrier temperature with the value oscillation decrement in the classical and quantum approximations. The comparative analysis of quantitative estimates of the increments of oscillation instabilities carried out in the work makes it possible to solve the problems of optimizing the operating characteristics of active devices in the microwave range. The results of the work can be used in the development of microwave devices designed to amplify, generate and convert electromagnetic oscillations in the millimeter and submillimeter ranges.

Keywords: flux of charged particles, electromagnetic radiation, semiconductor structures, surface vibrations, increment oscillation instability.

Introduction

The need to master the submillimeter and shortwave part of the millimeter range of electromagnetic oscillations is one of the main problems of modern radiophysics. These ranges are important when conducting research in various areas of theoretical physics, but also in medicine, biology, many technical applications: communication technology, radar, radio navigation, computer technology, etc.

When solving the problem of creating electromagnetic radiation sources of this range, it is necessary to study plasma-wave effects, resonances and unstable states in solids. Interest in them is determined by the search for new possibilities for generating oscillations in this range, as well as by the problems of radiospectroscopy of solids. Obviously, a necessary condition for the successful solution of the tasks set is the availability of an appropriate element base, created on the basis of materials with predictable parameters.

Modern technology makes it possible to create conductive solid-state structures: films, metal-dielectric-semiconductor (MIS) structures, semiconductors with two-dimensional (2D) electron gas and superlattice, etc. When studying the electronic properties of ultrathin layers and determining the mechanisms of their formation, it becomes necessary to study plasma oscillations due to the collective behavior of charges.

The processes of generation of oscillations in the submillimeter and short-wavelength parts of the millimeter range under the influence of external electromagnetic fields have a significant impact on the performance of semiconductor devices, since the generation mode distorts the current-voltage characteristics of radio products.

This work belongs to this area of reversible failure research. It considers the processes of collisionless damping of surface oscillations, when the interaction of waves and charged particles induced by external radiation is described by the method of secondary quantization of the system and has the character of random collisions. Such interaction of waves and induced currents leads to the appearance of reversible failures of radio products (temporary changes in their performance) and affects their electromagnetic compatibility.

Task solution

The object of the study is the surface oscillations of semiconductor structures included in the composition of electrical and radio products and the mechanisms of their interaction with conduction electrons, leading to damping of oscillations under the influence of an external electromagnetic field.

To determine the spectrum of natural (surface) oscillations and decrements of their collisionless

damping at the boundary of two semi-infinite media under conditions of neglecting the effect of delay of the electromagnetic field, we use the following system of equations:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E}(x, y, t) &= 0; \\ \vec{E}(x, y, t) &= \vec{E}(\omega, q_x, y) e^{i(q_x x - \omega t)}; \\ \vec{E}(\omega, q_x, y) &= (E_x, E_y, 0); \\ \operatorname{div} \vec{D}(\omega, x, y) &= 0; \\ \vec{D}(\omega, x, y) &= \varepsilon_0(y) \vec{E}(\omega, x, y) + \frac{4\pi i}{\omega} \vec{j}(\omega, x, y); \\ \varepsilon_0(y) &= \begin{cases} \varepsilon_{01}, & y > 0; \\ \varepsilon_{02}, & y < 0; \end{cases} \quad \vec{E} = \begin{cases} \vec{E}_1, & y > 0; \\ \vec{E}_2, & y < 0; \end{cases} \\ \vec{j} &= \begin{cases} \vec{j}_1, & y > 0; \\ \vec{j}_2, & y < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

with boundary conditions at $y = 0$: the continuity of the tangential components of the electric field E_x and the normal components of the electric induction D_y .

Let us consider the attenuation of surface plasmons at the boundary of two media, which, at a temperature $T = 0$, are characterized by dielectric permittivity.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}.$$

If the media are separated by an infinitely high potential barrier $\omega_{01} \neq \omega_{02}$, then the electromagnetic properties of such a semi-limited medium are identical to the properties of an infinite one, and the particles experience elastic (mirror) reflection from the barrier on both sides. The results obtained in [3] in the classical approximation for a plasma–dielectric interface (nonabsorbing medium) can be extended to the case of two plasma-like media separated by a dielectric layer whose thickness is small compared to the wavelength.

Based on the model of a homogeneous medium, we will assume, as in the case of a cold plasma, that both media are unlimited, and the fields and currents in each of them satisfy the boundary conditions on the plane $y = 0$ and decrease at $y \rightarrow \pm \infty$. Obviously, such a model is quite justified if the boundary is transparent for particles, those. the height of the potential barrier is small compared to the particle energy. Then the equation for the conduction current can be written as:

$$\vec{j}(\omega, \vec{r}) = -\frac{e^2 n_0}{mc} \vec{A}(\omega, r) + \vec{j}'(\omega, r). \quad (3)$$

Here, $\vec{A}(\omega, \vec{r}) = \frac{c}{i\omega} \vec{E}(\omega, \vec{r})$ is the vector potential, $n_0 = \sum \rho_k^0 \psi_k^*(\vec{r}) \psi_k(\vec{r})$ is the equilibrium concentration of electrons ρ_k^0 , their equilibrium distribution function, $\psi_k(\vec{r}) = V^{-1/2} \exp(ik\vec{r})$ is the wave function of an electron with the dispersion law, $E_k = \hbar^2 k^2 / (2m)$, V is the volume of the medium,

$$\vec{j}'(\omega, \vec{r}) = \sum \rho_{kk'}(\omega) \vec{j}_{k'k}(\vec{r})$$

is the conduction current due to transitions of electrons between states k and k' ($k_z = k'_z$) due to their inelastic scattering on the potential

$$\vec{A}(\omega, \vec{r}) = \vec{A}(\omega, q_x, y) e^{i(q_x x - \omega t)}$$

(hereinafter, for definiteness, we assume that is the perturbed off $q_x > 0, \omega > 0$), $\rho_{kk'}^0(\omega)$ - diagonal correction to the equilibrium distribution function of particles, determined from the equation of motion for the density matrix [2]:

$$\begin{aligned} \rho_{kk'}(\omega) &= \frac{\rho_k^0 - \rho_{k'}^0}{\hbar(\omega_{kk'} - \omega^*)} H_{kk'}(\omega); \\ \omega_{kk'} &= \frac{\hbar(k^2 - k'^2)}{2m}; \\ \omega^* &= \omega + i\nu, \quad \nu \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (4)$$

where $H_{kk'} = \frac{ie\hbar}{2mc} \int \psi_k^*(\vec{r})(\vec{A}\nabla + \nabla\vec{A})\psi_{k'}(\vec{r})d\vec{r}$ is the matrix element of the Hamiltonian of the interaction of electrons with an electromagnetic field;

$$\vec{j}_{kk'} = \frac{ie\hbar}{2m} \left\{ \nabla \psi_{k'}^*(r) \psi_k(r) - \psi_{k'}^*(r) \nabla \psi_k(r) \right\} - \quad (5)$$

is the matrix element of the particle current density operator. The result $\vec{j}'(\omega, \vec{r})$ is converted to the following form:

$$\begin{aligned} \vec{j}'(\omega, \vec{r}) &= \\ &= -\frac{1}{\hbar c} \sum \left[\begin{aligned} &\vec{j}_{k'k}(\vec{r}) \cdot \frac{(\rho_k^0 - \rho_{k'}^0)}{\omega_{kk'} - \omega^*} \times \\ &\times \left[H_{kk'}^s(\omega) + \int \vec{j}_{kk'}(\vec{r}) \vec{A}(\omega, \vec{r}) d\vec{r} \right] \end{aligned} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{where } H_{kk'}^s = \frac{ie\hbar}{2mc} \int \left[\begin{aligned} &dx dz \psi_k^*(x, 0, z) \psi_{k'}(x, 0, z) \times \\ &\times [A_y(\omega, x, +0) - A_y(\omega, x, -0)] \end{aligned} \right].$$

In expression (3) for the total current, the first term determines the frequency of surface plasmons, and the second determines their damping.

Substituting further $\vec{j}(\omega, \vec{r})$ into equation (2) and taking into account equation (3), we obtain:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 A_x(\omega, x, y)}{\partial y^2} - q_x^2 A_x(\omega, x, y) &= \\ &= -\frac{4\pi i q_x c}{\omega^2 \varepsilon(\omega)} \operatorname{div} \vec{j}'(\omega, x, y); \\ \varepsilon(\omega) &= \begin{cases} \varepsilon_1(\omega), & y > 0; \\ \varepsilon_2(\omega), & y < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

The solution of equation (7) must be sought by the method of successive approximations, since the oscillation damping decrement is small compared to their frequency. We find for $\varepsilon(\omega) \neq 0$ the following expressions for the potential in each of the media,

assuming, in the first approximation, the right side equal to zero:

$$\begin{aligned} y > 0, \quad A_{1x}(y) &= A_1 e^{-q_x y}, \quad A_{1y} = iA_{1x}(y); \\ y < 0, \quad A_{2x}(y) &= A_2 e^{-q_x y}, \quad A_{2y} = -iA_{2x}(y). \end{aligned} \quad (8)$$

Taking into account the fact that the normal component $\vec{A}(y)$ experiences a discontinuity in the plane $y = 0$, we continue the potentials, respectively, to the half-spaces

$$\begin{aligned} y < 0 \quad u \quad y > 0: A_x(-y) &= A_x(y); \\ A_y(-y) &= -A_y(y). \end{aligned}$$

Substituting the values $\vec{A}(\omega, \vec{r})$ in formula (3), after replacing the summation \sum_k with integration $\frac{V}{(2\pi)^3} \int d\vec{k}$. and, integrating over the entire space \vec{r} , we obtain

$$\begin{aligned} \vec{j}'(\omega, \vec{r}) &= \frac{e^2 \hbar A e^{iq_x x}}{2(2\pi)^4 m^2 c} \times \\ &\times \int \left[\frac{d\vec{k} dk'_y}{\omega_{kk'} - \omega} (\rho_k^0 - \rho_{k'}^0) (\vec{k} + \vec{k}') \times \right. \\ &\left. \times \left[1 - \frac{k^2 - k'^2}{q_x^2 + (k_y - k'_y)^2} \right] e^{i(k_y - k'_y)y} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

At this point $k'_x = k_x - q_x$, $k'_z = k_z$.

The current resulting from the transition of an electron from a state k to a state k' with the emission of a quantum $\hbar\omega$ of an electromagnetic field is determined by a term proportional to ρ_k^0 . In this case, one can perform integration k'_y , over taking $k_x \gg q_x$, $\omega \gg q_x v_x$ into account the contributions of the poles

$$k_y'^2 = k_y^2 - \frac{2m(\omega + i\nu)}{\hbar}.$$

The term $\rho_{k'}^0$ determines the current associated with the transitions of electrons from state k' to state k upon absorption of energy $\hbar\omega$. This current is determined by the poles $k_y^2 = k_y'^2 + \frac{2m(\omega + i\nu)}{\hbar}$ when integrated over k_y .

As a result of integration, we get:

$$\begin{aligned} \vec{j}'(\omega, \vec{r}) &= \frac{-ie^2 \omega A e^{iq_x x}}{(2\pi)^3 \hbar c} \times \\ &\times \int \left[\left(\frac{d\vec{k} (\vec{k} + \vec{k}_\pm) \rho_k^0}{k_y^\pm (k_y - k_y^\pm)^2} \left[1 - \frac{\hbar(k_y - k_y^\pm)^2}{2m\omega} \right] \right) \right. \\ &\left. \exp\left\{ i \left[k_y - k_y^\pm + i\delta_\pm \right] y \right\} \right] - \end{aligned} \quad (10)$$

$$\left. - \int \left(\frac{d\vec{k} (\vec{k} + \vec{k}_\pm) \rho_k^0}{k_y^\pm (k_y - k_y^\pm)^2} \left[1 - \frac{\hbar(k_y - k_y^\pm)^2}{2m\omega} \right] \right) \exp\left\{ i \left[k_y^\pm - k_y + i\delta_\pm \right] y \right\} \right\}.$$

$$y < 0, \quad k_y^\pm = \sqrt{k_y^2 \pm \frac{2m\omega}{\hbar}} > 0,$$

Here

$$\vec{k}_\pm = (k_x, k_y^\pm, k_z), \quad \delta_\pm = \frac{m\nu}{\hbar k_y^\pm}.$$

It can be seen that the current $\vec{j}'(\omega, \vec{r})$, arising as a result of electronic transitions between states k_y and k_y' is an infinite set of spatial harmonics with a period $\frac{2\pi}{|k_y - k_y^\pm|}$, depending on the frequency of the field and the momentum of the particle, with an amplitude decreasing from the boundary as $\exp(-\delta_\pm |y|)$.

Such harmonics (in the classical limit $k_y^2, k_y'^2 \gg 2m\omega/\hbar$) are known as "Van Kampen waves", whose phase velocity is equal to the velocity of the particle. The potential excited by the current $\vec{j}'(\omega, x, y)$ is found by substituting (6) into equation (7).

$$A'_x(\omega, q_x, y) = \frac{i\alpha(\omega, q_x, y)}{\varepsilon(\omega)} A;$$

$$A'_y(\omega, q_x, y) = \frac{A}{q_x \varepsilon(\omega)} \frac{\partial \alpha}{\partial y}(\omega, q_x, y);$$

$$\alpha(\omega, q_x, y) = \frac{e^2 q_x m}{\pi^2 \hbar^2} \times$$

$$\begin{aligned} &\times \left\{ \int' \left(\frac{\rho_k^0 d\vec{k}}{k_y^\mp (k_y \mp k_y^\mp)^4} \left[1 - \frac{\hbar(k_y \mp k_y^\mp)^2}{2m\omega} \right] \times \right) \right. \\ &\quad \times \exp\left\{ i(k_y \mp k_y^\mp \pm i\delta_\mp) y \right\} \left. \right) - \\ &- \int' \left(\frac{\rho_k^0 d\vec{k}}{k_y^+ (k_y \mp k_y^+)^4} \left[1 - \frac{\hbar(k_y \mp k_y^+)^2}{2m\omega} \right] \times \right) \\ &\quad \times \exp\left\{ i(\pm k_y^+ - k_y \pm i\delta_+) y \right\} \left. \right). \end{aligned} \quad (11)$$

The upper signs before k_y^\mp and δ_\mp refer to the half-space, the lower ones $y > 0$, respectively, to the half-space $y < 0$.

Uncertain constants A_1 and A_2 can be eliminated by means of boundary conditions and obtain a dispersion equation:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(\omega) \left[1 + i \frac{\alpha_2(\omega, q_x, 0)}{\varepsilon_2(\omega)} \right] + \\ + \varepsilon_2(\omega) \left[1 + i \frac{\alpha_1(\omega, q_x, 0)}{\varepsilon_1(\omega)} \right] = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Hence, when $\left| \frac{\alpha(\omega, q_x, 0)}{\varepsilon(\omega)} \right| \ll 1$ we get:

$$\omega_s = \left(\frac{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2}{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}} \right)^{1/2};$$

$$\Delta\omega_s = \frac{i\omega_s}{2} \frac{[\alpha_1(\omega, q_x, 0) + \alpha_2(\omega, q_x, 0)]}{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}}.$$

Analysis

Let us now find the damping decrements in various physical situations. In the case of a Maxwellian distribution of electrons

$$\rho_k^0 = \frac{(2\pi\hbar)^3 n_0}{(2\pi mT)^{3/2}} e^{-\frac{\hbar^2 k^2}{2mT}}$$

expression for $\alpha(\omega, q_x, 0)$ can be converted to the following form:

$$\alpha(\omega, q_x, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_0^2 q_x \nu_T T}{\hbar \omega^4} (e^{\frac{\hbar\omega}{T}} - 1) \int_{-\infty}^{\infty} (x^2 + \frac{\hbar\omega}{T})^{\frac{1}{2}} x^2 e^{-x^2} dx.$$

At this point, we get:

$$\alpha = -2 \frac{\omega_0^2 q_x \nu_T}{\omega_s^3} \sqrt{\frac{T}{2\hbar\omega_s}}, \quad \frac{\hbar\omega_s}{T} \gg 1;$$

$$\alpha = -2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_0^2 q_x \nu_T}{\omega_s^3}, \quad \frac{\hbar\omega_s}{T} \ll 1.$$

At the boundary of two plasma media separated by an infinitely high potential barrier, the expressions for the decrement take the form:

$$\Delta\omega_s = -i \frac{q_x}{\sqrt{2\hbar\omega_s}} \frac{\sum \omega_{0i}^2 \nu_{Ti} T_i^{1/2}}{\sum \omega_{0i}^2};$$

$$\Delta\omega_s = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} i q_x \frac{\sum \omega_{0i}^2 \nu_{Ti}}{\sum \omega_{0i}^2}; \quad i = 1, 2, \dots$$

In the case of an infinitely small barrier:

$$\omega_{01} = \omega_{02}, \quad \varepsilon_{01} \neq \varepsilon_{02}, \quad \omega_s = \omega_0 \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}}}.$$

the oscillation decrements are respectively equal to:

$$\Delta\omega_s = -i q_x \nu_T \sqrt{\frac{T}{2\hbar\omega_s}}; \quad \hbar\omega_s \gg T;$$

$$\Delta\omega_s = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} i q_x \nu_T; \quad \hbar\omega_s \ll T.$$

A comparative analysis of the experimental [11] and calculated data obtained using the damping decrement values (14) – (15) shows that the radiation energy for most semiconductor devices [2] (diodes) in the presence of external electromagnetic radiation (electric field strength amplitude $E < 100 \frac{\kappa B}{\mathcal{M}}$, pulse duration

$\Delta t_{imp} \approx 10^2 - 10^3 \text{ ns}$) is determined by one order of magnitude and has general trends of change depending on the values

$$\Delta W_{RAD} \approx 10^{-7} - 10^{-9} \text{ Joules}$$

of the physical parameters of the component materials and the acting voltage pulse.

Conclusions

The mechanism of interaction of conduction electrons of a semiconducting medium with surface vibrations is considered, when the interaction of waves and charged particles induced by external radiation is in the nature of random collisions and is described by the second quantization method.

Based on it, a physical model of the occurrence of reversible failures is implemented as a consequence of the influence of currents induced by electromagnetic radiation per volt - ampere characteristics of semiconductor devices.

A kinetic equation is obtained that describes the change in the number of surface plasmons as a result of their interaction with conduction electrons; its solutions are given, which determine the decrement of oscillations and the power of spontaneous emission of particles.

Expressions are given for the decrements of surface plasmons in the presence of an infinitely high and infinitely small potential barrier at the interface between the media.

Calculation relations are obtained that relate the parameters of semiconductor structures: the concentration of free carriers, dielectric permittivity, carrier temperature with the magnitude of the oscillation decrement in the classical and quantum approximations.

REFERENCES

1. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Ensuring the resistance of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation. - M.: Radio and communication, 1988, 235 p.
2. Mikhailov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Electromagnetic influences on communication facilities. - M.: Radio and communication. - 1979. - 225 p.
3. M. Steele and B. Vyural, Interaction of Waves in Solid State Plasma. - M.; Atomizdat - 1973. - 312 p.
4. Beletsky N.N., Svetlichny V.M., Halameida D.D., Yakovenko V.M. Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures. - Kyiv: Science thought. - 1991. - 216 p.
5. Zee C. Physics of semiconductor devices. - M.: Mir. - 1984. - 456 p.
6. Kravchenko V.I., Yakovenko V.I., Yakovenko I.V., Losev F.V. Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electrical radio products // Bulletin of NTU "KhPI" - 2009. - No. 11. - P.62 - 69.

7. Kravchenko V.I., Yakovenko I.V., Losev F.V. Excitation of electromagnetic oscillations in 2-D electronic structures by currents induced by external radiation // Bulletin of NTU "KhPI" - 2012. - No. 21. - P.154 - 161.
8. Kravchenko V.I., Yakovenko I.V., Losev F.V. Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence // Bulletin of NTU "KhPI" -2012. - No. 21. - P.161-169.
9. Kravchenko V.I., Yakovenko I.V., Losev F.V. Influence of the flow of charged particles, induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electrical and radio products // Bulletin of NTU "KhPI" - 2013. - No. 27. - P.83–89.
10. Kravchenko V.I., Yakovenko I.V., Losev F.V. Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of a semiconductor superlattice // Bulletin of NTU "KhPI" - 2013. - No. 27. - P.89–96.
11. Kravchenko V.I., Yakovenko I.V., Losev F.V. Attenuation surface vibrations of semiconductor structures of electrical and radio products under the influence of external electromagnetic radiation // Bulletin of NTU "KhPI" - 2013. - No. 27. - P.96–103.
12. Kravchenko V.I., Yakovenko I.V., Losev F.V. Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation // Bulletin of NTU "KhPI" - 2013. - No. 27. - P.103–111.

Received (Надійшла) 14.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.02.2023

Вплив електромагнітного випромінювання на стійкість напівпровідникових приладів

А. А. Серков, В. С. Бреславець, Ю. В. Бреславець, І. В. Яковенко

Анотація. Предметом дослідження є процес аналізу та механізми появи нестійкостей власних коливань напівпровідникових структур, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання. Показано, що вплив імпульсного електромагнітного випромінювання супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів, здатних збуджувати власні коливання напівпровідникових комплектуючих та бути причиною відмов радіовиробів. **Метою статті** є розробка теорії беззітквального згасання поверхневих поляритонів в класичному наближенні, а також дослідження механізмів беззітквального згасання поверхневих плазмонів на межах напівпровідникових комплектуючих радіовиробів в умовах, коли температура носіїв твердих тіл набагато менше енергії плазмону (квантове наближення). **Цілі такі:** кінетичне рівняння, що описує зміну числа поверхневих плазмонів внаслідок їх взаємодії з електронами провідності; отримання його рішення, що визначають декремент коливань та потужність спонтанного випромінювання частинок. **Методи, що застосовувались при дослідженні:** метод послідовних наближень розв'язання кінетичних рівнянь системи потік заряджених частинок – напівпровідникова структура в рамках квантового підходу, коли взаємодія хвиль та частинок носить характер випадкових зіткнень та описується методом вторинного квантування системи (подання чисел заповнення). **Отримано такі результати.** Отримано вирази для декрементів поверхневих плазмонів за наявності нескінченно високого та нескінченно малого потенційного бар'єру на межі розділу середовищ. Отримано кінетичне рівняння, що описує зміну числа поверхневих плазмонів у результаті взаємодії з електронами провідності; наведено його рішення, що визначають декремент коливань. Отримано вирази для декрементів поверхневих плазмонів за наявності нескінченно високого та нескінченно малого потенційного бар'єру на межі розділу середовищ. Обґрунтовано фізичну модель виникнення оборотних відмов (вплив наведених електромагнітним випромінюванням струмів на вольт – амперні характеристики напівпровідникових приладів). Визначено області параметрів зовнішнього електромагнітного випромінювання, за яких реалізується дана фізична модель. **Висновки.** Отримано розрахункові співвідношення, що зв'язують параметри напівпровідникових структур: концентрацію вільних носіїв, діелектричну проникність, температуру носіїв з величиною декременту коливань у класичному та квантовому наближеннях. Проведений у роботі порівняльний аналіз кількісних оцінок інкрементів нестійкостей коливань дозволяє вирішувати завдання оптимізації робочих характеристик активних приладів НВЧ –діапазону. Результати роботи можуть бути використані при розробці приладів НВЧ – діапазону призначених для посилення, генерації та перетворення електромагнітних коливань міліметрового та субміліметрового діапазонів.

Keywords: потік заряджених частинок, електромагнітне випромінювання, напівпровідникові структури, поверхневі коливання, інкремент нестійкості коливань.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Альошин С. П.	46	Караман Д. Г.	15	Понамарьов В. О.	91
Бараненко Р.	66	Клещ Д. С.	96	Пономаренко О. Є.	138
Барковська О. Ю.	31	Климова І. М.	150	Почерняєв В. М.	171
Башилов В. С.	122	Коваленко А. А.	101, 104	Радченко С. С.	69
Бельорін-Еррера О. М.	118	Коломієць В. В.	36	Рог В. Є.	118
Бовчалоук С. Я.	69	Колтун Ю. М.	150	Серков А. А.	177
Бойко А. Д.	4	Корнієнко Д. Ю.	150	Сивкова Н. М.	171
Бойко В. В.	73	Коробський В. В.	127	Скакаліна О. В.	145
Бондаренко Б. В.	167	Косенко В. В.	159	Склярів А. С.	31
Бороздін М. К.	60	Кравець В. Є.	108	Слабухо Д. О.	69
Бреславець В. С.	177	Кривуля Г. Ф.	108	Сокол Г.	66
Бреславець Ю. В.	177	Куліш Р. В.	10	Соловійов В. В.	60
Бунякіна Н. В.	60	Кульчій О. М.	60	Станко П. О.	19
Васюта В. Б.	51	Кучук Г. А.	167	Сукач С. В.	163
Васюта В. В.	51	Любченко Н. Ю.	134	Сухина Ф.Ф.	122
Гавриленко С. Ю.	78	Ляшенко О. С.	26	Терещенко Л. Ю.	19
Гайтан О. М.	46	Магомедова М. С.	171	Тищенко Д.	66
Галай В. М.	60	Мартинцов А. Ф.	101	Токарев В. В.	108
Галінський Д. О.	10	Мелешко Є. В.	112	Толкунова Ю. М.	40
Головка Г. В.	84	Мирошніченко Р. О.	101	Федорченко В. М.	96
Горбачов В. О.	138	Міхав В. В.	112	Філімончук Т. В.	26, 150
Гунбін М. В.	15	Можаєв М. О.	118	Філіппов В. В.	155
Данилейко А. С.	51	Можаєв О. О.	122	Франчук Т.	66
Денисенко М. А.	15	Невлюдова В. В.	127	Холєв В. О.	91
Дрючко О. Г.	60	Омаров М. А.	127	Челак В. В.	78
Жарова О. Б.	19	Онїщенко Д. П.	134	Ченчева О. О.	163
Заліський М. Ю.	19	Осіпчук А. О.	19	Шефер О. В.	60
Зуєв А. О.	15	Партика С. О.	155	Щербина О. А.	19
Іваненко Ю. В.	26	Пересічанський В. М.	118	Яковенко І. В.	177
Іващенко Г. С.	31, 91	Петренко І. С.	163	Янковський О. А.	155
Ільїна І. В.	108	Петрукович Д. Є.	134	Ярешенка В. В.	159
Калинович М. С.	84	Підгорний М. В.	73	Ярмак В. Л.	4
Капітон А. М.	145	Піскарьов О. М.	69	Ярошевич Р. О.	104
Карасва Н. В.	163	Подорожняк А. О.	134		

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 1 (71)

Відповідальна за випуск *К. С. Нестеренко*

Технічний редактор *Т. В. Уварова*

Коректор *О. В. Морозова*

Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук, І. Ю. Петровська*

Оформлення обкладинки *І. В. Ільїна*

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

Підписано до друку 24.03.2023. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 22,75. Тираж 120 прим. Зам. 324-23

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (050) 302-20-71

Національний університет «Полтавська політехніка 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. Широнішів, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34

e-mail: bookfabrik@mail.ua