

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 3 (69)

Issue 3 (69)

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 03 жовтня 2022 року № 18).

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 • 2022

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, доц., 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 Варбанетів
(*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*);
ТИМОЧКО Олександр Іванович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ТИМОЩУК 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*).

Технічний секретар:

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.), Ass. 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*);
Andriy 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*);
Oleksandr TYMOCHKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Olena TYMOSHCHUK,
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
Andrii TRYSTAN
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Chernihiv, Ukraine*);
Yevhen FROLOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*);
Oleksii CHORNYI
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kremenchuk, Ukraine*).

Responsible secretary:

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

Technical secretary:

Inna PETROVSKA
(*MSD of Comp. Eng., Kharkiv, Ukraine*).

З М І С Т

АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Аль-Амморі Алі, Ключан А. Є., Дегтярєва А. О., Аль-Амморі Х. А., Полева Н. М.</i> Інформаційно-факторні технології розгортання прогнозу на етапі експлуатації літаків нового покоління	4
<i>Окоро О. Ч., Заліський М. Ю., Осипчук А. О., Дмитрієв С. О.</i> Статистичні імітаційні моделі оптимізації технічного обслуговування повітряних суден	8

УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Войтенко С. С., Барвінський О. П., Бабич О. О., Мошаренков В. В.</i> Розгляд вимог EN ISO/IEC 17025 стосовно калібрувальної лабораторії в частині процесів валідації методів калібрування засобів вимірювальної техніки	13
<i>Гапон А. І., Денисенко М. А., Зуєв А. О., Євсіна Н. О.</i> Моделювання системи сушіння за допомогою нейронного регулятора	18
<i>Дрючко О. Г., Шефер О. В., Галай В. М., Боряк Б. Р., Захарченко Р. В., Плешкань Д. П.</i> Модифікування характеристик фотокаталітично-активних функціональних вузлів адаптивних систем очищення повітря з використанням координаційних нітратів рідкісноземельних елементів та лужних металів	22
<i>Kapiton A., Varanenko R., Tyshchenko D., Franchuk T.</i> Implementation of complex solutions in the process of using cat systems	33
<i>Леві І. І.</i> Технічна реалізація гідравлічного регулятора рівня ґрунтових вод	36
<i>Мураховська О. А., Українець Н. А.</i> Аналіз застосування методів статистичної обробки експертних оцінок на етапі попереднього проектування складних технічних пристроїв	39
<i>Носков В. І., Скородєлов В. В., Гейко Г. В., Ліпчанська О. В.</i> Оптимізація режимів роботи тягового привода	45

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Баранов Г. Л., Комісаренко О. С., Кравчук В. І., Іванюта М. В.</i> Проблеми агротехнологічного електронного картографування для отримання врожаїв рослинництва	49
<i>Беркман Л. Н., Барабаш О. В., Ткаченко О. М., Мусієнко А. П., Лантєв О. А., Свинчук О. В.</i> Інтелектуальна система управління для інфокомунікаційних мереж	54
<i>Гавриленко В. В., Івохіна К. Є., Рудоман Н. В.</i> Про застосування методу імітації відпалу для розв'язання нечіткої задачі комівояжера	60
<i>Dmytrenko T., Derkach T., Dmytrenko A.</i> Development of information intelligent system for management of scientific and scientific-technical activities higher education institutions	64
<i>Івохін Є. В., Махно М. Ф., Рець В. О.</i> Про один спосіб аналізу тональності текстів за допомогою штучних нейронних мереж	71
<i>Kozlov V., Kozlov Y., Novikova O., Olenchenko V.</i> Definition as a definitive aspect sense of the study problem	75
<i>Пащенко Р. Е., Марюшко М. В.</i> Прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткого опису чинників впливу та індикаторів стану посівів	78
<i>Резанов Б. М.</i> Аналіз шляхів зменшення затримки мікропотоків в комп'ютерних системах підтримки ІОТ на туманній платформі	88
<i>Смірнова Т. В., Якименко Н. М., Смірнов С. А., Поліщук Л. І., Смірнов О. А.</i> Дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах	93
<i>Чалий С. Ф., Лецинський В. О., Лецинська І. О.</i> Каузальна модель процесу побудови пояснень в інформаційній системі	99

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Mosov S., Horskyi O.</i> Technical aspects of aviation firefighting in ecosystems: the experience of foreign countries	104
<i>Триснюк В. М., Нагорний Є. І., Триснюк Т. В., Конецька О. О., Курило А. В.</i> Методика виявлення радіаційного забруднення місцевості та його ризиків	112

ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

<i>Голь В. Д., Раківська А. Ю., Раківський Д. Ю.</i> Засоби кіберзахисту на рівні мережної інфраструктури	116
<i>Карлов В. Д., Кузнєцов О. Л., Коломійцев О. В., Красношанка І. В., Петрушенко І. М., Струцінський О. В.</i> Можливості врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти аеродинамічного об'єкта	121
<i>Пелешок Є. В., Вовк С. І., Соловей Х. І.</i> Методика синтезу підоптимального алгоритму розділення-демодуляції двох взаємно неортогональних сигналів QPSK	128
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	132

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 007.629.735

doi: 10.26906/SUNZ.2022.3.004

Алі Аль-Амморі, А. Є. Клочан, А. О. Дегтярьова, Х. А. Аль-Амморі, Н. М. Полева

Національний транспортний університет, Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНО-ФАКТОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗГОРТАННЯ ПРОГНОЗУ НА ЕТАПІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІТАКІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Анотація. Метою даної статті є розробка інформаційно-факторних технологій розгортання на етапі експлуатації літаків нового покоління для зменшення помилок екіпажу під час їх управління. У статті розглядаються інформаційно-факторні технології прогнозування потенційної аварійної статистики за людським чинником для літаків, що знаходяться на початковій стадії експлуатації. Це досягається шляхом підбору літака-аналогу за коефіцієнтами розгортання із сімейства літаків, які мають багаторічну експлуатацію, а також репрезентативну та представницьку статистику аварійних пригод за людським чинником. Таке прогнозування дозволить зняти та зменшити частку людського чиннику в аварійній статистиці шляхом обґрунтування існуючих програм підготовки льотного складу з переходом до якісно нових принципів підготовки льотного складу, а також шляхом використання можливостей літаків нового покоління як літаючого автоматизованого електронного комплексу.

Ключові слова: розгортання прогнозу, інформаційно-факторні технології, аварійна статистика, літак нового покоління, програма підготовки льотного складу, технологія виконання польоту.

Вступ

Постановка проблеми. В даний час інтенсивно йдуть процеси експлуатації літаків нового покоління (ЛНП), таких як ТУ-204, ІЛ-96-300, Ан-140, Ан-148, Ан-158, Boeing-777, А-320 та інших. Дуже важливо на етапі експлуатації зробити статистичні прогнози експлуатації ЛНП, будуючи прогноз за принципом – “ЛНП – аналог”, та проводити порівняння між ЛНП та літаком – аналогом за аварійною статистикою літака – аналога та циклограмами розгортання рахункових операцій з керівництва по льотній експлуатації (КЛЕ) ЛНП.

З цією метою у роботі наведено прогноз, виконаний з використанням технологій процесного аналізу польоту (ТПАП) [1-3] літака ІЛ-96-300 в порівнянні з літаком Boeing -747-400.

Перспективні види інформаційно-факторних технологій (ІФТ) показані на рис. 1, з якого випливає, що ІФТ застосовуються в структурі експлуатації повітряного судна (ПС), центральною частиною якої відповідно до документів ІКАО є виробництво польотів. Тому розробка ІФТ під час виробництва польотів є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [1] проводиться аналіз питання застосування процесного підходу у транспортних процесах та висвітлюється проблема вивчення виробництва польотів на ЛНП. Роботи [2, 3] спрямовані на зняття аварійності по людському чиннику (ЛЧ), внаслідок реальних та потенційних помилок екіпажу, на ЛНП, які, за даними ІКАО, на сьогоднішній день досягають 80-85%. У КЛЕ та програмах льотного навчання [4, 5, 6] показано, що складність вправ та час їх відпрацювання не мають чітко вираженої залежності. Так на деякі складні вправи дається менше часу, ніж на простіші. Тому виникла потреба

розгляду КЛЕ ЛНП для виключення та зменшення коефіцієнта аварійності щодо ЛЧ та його прогнозування для певних типів літаків.

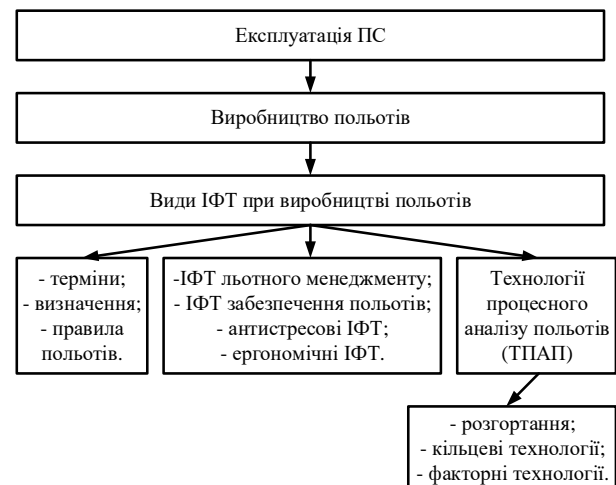


Рис. 1. Основні види ІФТ під час виробництва польотів

Основною метою даної статті є розробка інформаційно-факторних технологій розгортання на етапі експлуатації ЛНП для зменшення помилок екіпажу під час їх управління.

Виклад основного матеріалу

До ІФТ можна віднести ІФТ льотного менеджменту, ТПАП, а також антистресові технології забезпечення польотів. При аналізі процесів польоту доцільно застосувати нові аналітико-інформаційні ТПАП, а саме: технологію розгортання, кільцеві технології та факторні технології. Технології розгортання полягають в складанні нових технологічних карт процесу польоту - циклограм розгортання, а також побудові гістограм розгортання та різних діаграм розгортання.

В даний час створені та використовуються в льотній практиці довідники з циклографії розгортання літаків АН-124-100, ІЛ-76, ІЛ-96-300, ТУ-204 та для літаків компанії Boeing. Кільцеві технології застосовуються при аналізі потоків зауважень авіаційних фахівців, аналізі факторних списків, обліку концепцій причинності авіаційних подій. Факторні технології є сукупністю технологій з обліку комплексу факторів, факторних переходів, явищ факторного резонансу та інших поліфакторних процесів. Найбільш знайомою авіаційним спеціалістам з факторних технологій ТПАП є технологія обліку "факторних накладок" - метод аналізу факторних накладок (так званих ефектів факторної мультиплікації).

Циклографія розгортання є новою пріоритетною технологією процесного аналізу польотів, що призначена для зменшення аварійності по ЛЧ.

Циклографія розгортання дозволяє оцінити технологічні складності експлуатації ПС та врахувати технологічні максимуми у льотній експлуатації з метою зменшення негативних ефектів інформаційно-факторного навантаження при впливі ефекту поліфакторності та комплексу одночасно взаємодіючих факторів. Практика багаторічної експлуатації ІЛ-96-300 показала, що ІЛ-96-300 не лише не гірше, а значно краще за статистику, ніж Boeing-747-400, А320 тощо. За ці роки на ІЛ-96-300 не було жодної катастрофи чи авіаційної пригоди. Етап експлуатації літаків нового покоління потребує розрахунків за прогнозами аварійної статистики з ЛЧ. Аналіз процесів розгортання рахункових операцій та розрахунок лише на рівні розгортання дозволяють зробити це.

Ідея статистичного прогнозу аналізу процесів розгортання полягає в тому, що є досить чітко виражена аналогія між процесами розгортання за етапами польотів та часткою аварійної статистики за ЛЧ по етапам польотів. Аварійна статистика повторює характер процесів розгортання в тому, що найбільш розгорнуті етапи, наприклад, зліт, захід на посадку та посадка мають підвищену аварійність за ЛЧ. Тому, якщо знайти аналог нового літака за коефіцієнтами розгортання (КР) за етапами польоту серед сімейства літаків, які експлуатуються вже багато років і мають досить представницьку статистику щодо авіаційних пригод, то можна дати прогноз і за аварійною статистикою нового літака вже на початковій стадії його експлуатації та своєчасно приймати заходи щодо зменшення аварійності за ЛЧ.

Коефіцієнт розгортання можна представити такою залежністю: $k_p = k_{СМО}/k_{ЛО}$, де k_p – коефіцієнт розгортання, $k_{СМО}$ – кількість сенсомоторних операцій (СМО), $k_{ЛО}$ – кількість лічильних операцій (ЛО). Аналіз процесів розгортання різних типів літаків показав, що для літака ІЛ-96 аналогом по операціях розгортання можна вважати Boeing -747 [4, 5].

На рис. 2, який складений за статистикою фірми "Boeing", шляхом процесного аналізу КЛЕ Boeing 747-400 показані тенденції зміни частки льотних пригод по етапах польоту та розподіл коефіцієнтів розгортання по цих же етапах.

На рис. 3 показано розподіл коефіцієнтів розгортання по етапах польоту літака Boeing -747.

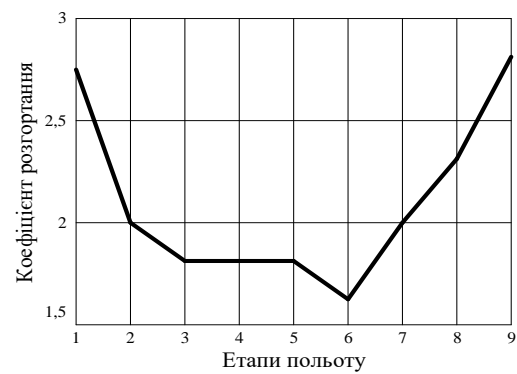


Рис. 2. Розподіл частки авіапригод за даними фірми "Boeing"

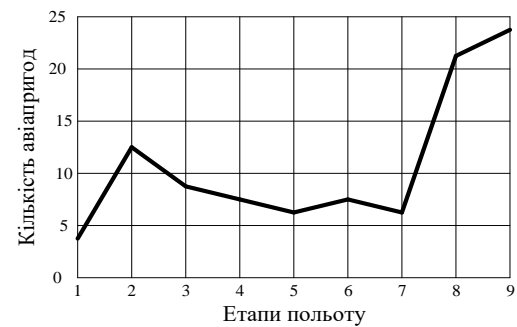


Рис. 3. Розподіл коефіцієнтів розгортання на етапах польоту для літака Boeing -747. 1 - посадка пасажирів, рулювання; 2 – зліт; 3,4 – набір висоти; 5 – крейсерський політ (маршрут); 6 – зниження; 7- етап початкової підготовки; 8-кінцевий етап заходу; 9 – посадка

Порівняння рис. 2 і 3 наочно показує, що природа процесу розгортання рахункових операцій та процесу зміни частки аварійності подій однорідна, а кількісні зрушення у цих процесах фактично збігаються: найбільші коефіцієнти розгортання відповідають ділянкам польоту з максимальним ступенем аварійності. Це, звісно, закономірний результат. Якщо взяти до відома, що коефіцієнти розгортання пропорційні ступеню технологічної складності польоту, то стає зрозумілим, чому кількісні та якісні зміни в цих процесах - у процесі розгортання за етапами та зміни частки аварійності по етапах тотожні.

На рис. 4 наведено дані з гістограмного аналізу циклограм розгортання ІЛ-96 та Boeing -747, які показують однорідність процесів розгортання рахункових (нормальних) операцій та процедур для цих літаків. У табл. 1-3 наведено статистику фірми "Boeing" по льотним обставинам, а в таблицях 4 і 5 - розрахунки коефіцієнтів розгортання для літаків ІЛ-96 і Boeing -747. Тому в процесі експлуатації ІЛ-96-300, що має статистику по ЛЧ (екіпажу) фірми "Boeing" для літака ІЛ-96, можна було прийняти як однорідну статистику (статистику - аналог з причин льотних пригод) при прогнозі можливої аварійності. Аналіз даних показує, що помилки, відхилення тощо. розглядаються без аналізу технологічних процесів розгортання та їх складності, що ускладнює запобігання авіапригод. Використовуючи принцип аналогії та закону логічного висновку за аналогією, у 1994 році було зроблено прогноз щодо ходу початкової експлуатації ІЛ-96 та його можливої аварійної статистики з ЛЧ.

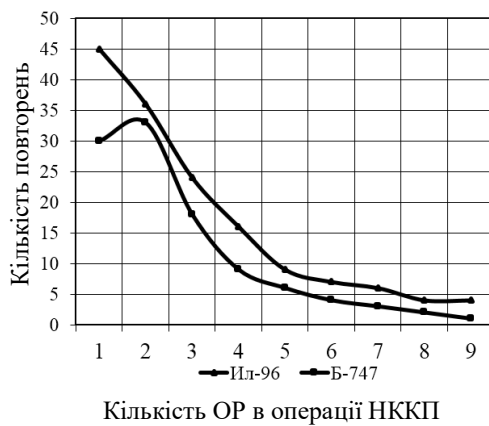


Рис. 4. Результати гістограмного аналізу циклограм розгортання та порівняльного аналізу Boeing -747-400 та ИЛ-96-300 за технологіями процесного аналізу польоту (ОР – операції розгортання, НККП – нормальні контрольні карти перевірки)

Безумовно, метод аналогій у сфері статистики не видовим способом, а родовим, тобто. дуже важлива при цьому якісна аналогія, а кількісна аналогія є як доповненням до якісного прогнозу. Тому слід звернути особливу увагу на той факт, що порушення стандартних льотних процедур на літаках "Boeing" становить не менше 33, а при проведенні рекласифікації статистики фірми "Boeing" - всі 68. При цьому потрібно враховувати головне – це відбувається не з вини льотного складу, а через складність процесу польоту та невизначеність процесів розгортання етапів польоту в нормальних умовах. Вся справа у складності польоту та його стандартних процедурах. Звідси й головна вимога до програми підготовки льотного складу (ППЛС) [6] для вирішення проблеми ЛЧ (екіпажу) з аварійних пригод – протидія типу та максимуму процесів розгортання.

Результати порівняльного аналізу показують відносну однорідність процесів розгортання рахункових операцій ИЛ-96 (операцій нормальних (нормальних контрольних карток перевірки - НККП Boeing -747)) етапів польоту.

Таблиця 1 – Причини АП з вини льотного складу

№	Чинні причини льотних пригод	Кількість
1	Відхилення членами екіпажу від стандартних процедур	33
2	Погана взаємодія та невиконання членами екіпажу контрольних операцій	26
3	Неправильність дії членів екіпажу щодо усунення відхилень у роботі систем, що виникли	9
4	Пілот не усвідомив необхідності догляду на 2 коло	6
5	Недостатність техніки пілотування	4
6	Нездатність пілота впоратися з ситуаціями, що виникли	4
7	Неправильне виконання процедур догляду на 2 коло	3
8	Помилки пілота під час тренувальних польотів	3
9	Пізнні дії пілота на сигнали СБЗП (система попередження зближення землі)	3
10	Помилки пілота при частковій втраті видимості ЗПС нижче висоти прийняття рішення	3
11	Неправильне використання наявних засобів заходу на посадку	4
12	Недостатній досвід пілотів в експлуатації даного типу літака	2

Таблиця 2 – Причини льотних пригод на літаках фірми Boeing за останні 10 (25) років

№	Причина льотної події	Останні 10 років, %	Останні 25 років, %
1	з вини льотного складу	70.8	73.3
2	з вини авіатехніки	12.3	11.6
3	з вини техн. обслугов.	2.3	1.6
4	за погодними умовами	6.2	5.5
5	з вини служби руху	5.4	14.2
6	з інших причин	3.1	3.2

Таблиця 3 – Літні обставини та його розподіл за етапами польоту

№	Етапи польоту	%
1	Керування	3.1
2	Зліт	11.5
3	Початковий набір висоти	9.6
4	Наступний набір висоти	6.3
5	Політ за маршрутом	5.5
6	Зниження	7.9
7	Етап початкового заходу	7.2
8	Фінальний етап заходу	24.4
9	Посадка	24.5

Таблиця 4 – Розрахунок коефіцієнтів розгортання рахункових операцій за рівнем сенсомоторики для суб'єктів циклограми ИЛ-96

	Кількість рахункових операцій	Кількість сенсомоторних операцій	Коефіцієнти розгортання
КС	30	45	1.5
2/П	21	31	1.49
ПП	69	141	2.18
НП	16	52	3.29
КС,2/П	6	21	3.5
Б/І	66	172	2.6
Е	14	37	2.7

2/П – другий пілот; КС – командир літака; БІ – бортінженер; Е-екіпаж; ПП – пілотуючий пілот; НП – непілотуючий пілот

Таблиця 5 – Розрахунок коефіцієнтів розгортання рахункових операцій за рівнем сенсомоторики для різних етапів виконання польоту

Назва операцій	Кількість ЛО ИЛ-96-300	Кількість СМО ИЛ-96-300	КР ИЛ-96-300	КР Boeing -747-400	
Керування	31	62	2	2.7	
Зліт	60	116	1.9	1.9	
Набір висоти	19	37	1.9	1.9	
Крейсерський політ	21	40	1.9	1.9	
Зниження	19	35	1.8	1.7	
Захід на посадку	25	99	3.9	2.3	
Посадка	21	39	1.9	2.0	
Після посадки	25	52	2.1	2.8	
				Середнє	
				2.1	2.2

Кордони процесів розгортання по етапах польоту ИЛ-96 та Boeing-747 за кількістю розгортань в операції приблизно однакові (близько 7).

Межі нерозгортання та розгортання ИЛ-96 та Boeing-747 приблизно однакові (на рівні 0.5).

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Інформаційно-факторні технології це такі інформаційні технології, у структурі яких можна врахувати факторні явища та процеси.

2. Інформаційно-факторні технології може бути теоретичною основою до створення нових ІФ технологій. Заснована формула ІФА враховує будь-яку кількість експлуатаційних факторів.

3. За процесами розгортання рахункових операцій можна робити прогнози про потенційну аварійну статистику за людським фактором (екіпажем) літаків, що знаходяться на початковій стадії експлуатації, якщо підібрати літак-аналог за коефіцієнтами розгортання з сімейства тих літаків, які мають багаторічну експлуатацію і вже досить репрезентативну та представницьку статистику аварійних пригод за людським фактором.

4. Для зняття та зменшення частки людського фактору (екіпажу) в аварійній статистиці доцільно використати два основні шляхи: - здійснити багаторівневе обґрунтування існуючих одноетапних та однорівневих ППЛС із переходом до якісно нових принципів підготовки льотного складу на ІЛ-96 як літака нового покоління. - Використовувати реальні можливості СНП як літаючого автоматизованого електронного комплексу.

5. Необхідно враховувати, що поки що у технологію виконання польоту СНП як ТУ-204, ІЛ-96-300, АН-140, АН-148 конструктори та проектувальники неповністю вклали всі технічні можливості нових електронних систем літака (КІРС, ВСУП, ВСУТ тощо) .д.), та технології виконання польоту на СНП по РЛЕ перших редакцій якісно не відрізняється від технології виконання польоту на літаках

старого покоління, і містить невизначеності (невизначеність режимів етапів польоту, рахунково невизначені етапи польоту, невизначеність циклограмних функцій ПП-НП тощо).

6. Методи прогнозу аварійної ситуації щодо ЛФ (екіпажу) через коефіцієнти розгортання дозволяють враховувати результати прогнозу не лише на початковій стадії експлуатації СНП, але в умовах широкого впровадження у практику експлуатації ПС.

7. Під порушеннями стандартних льотних процедур (термінологія ІКАО або фірми "Боїнг") або порушеннями у виконанні рахункових операцій етапів польоту слід розуміти такі негативні кількісні або якісні зміни у технологічній послідовності операцій етапів польоту або у змісті самих операцій, що призводять до льотних (авіаційних)) подій через граничну складність процесів розгортання рахункових операцій (процедур) етапів польоту, але не через винність льотного складу. Отже, такі порушення повинні зніматися шляхом спеціальних заходів щодо розгортання у льотного складу належного рівня протидії будь-яким факторним накладкам та обліку "флуктуаційного" (випадкового, стохастичного тощо) характеру процесів розгортання рахункових операцій нормального польоту.

8. Аналіз процесів розгортання рахункових операцій етапів польоту на СНП, наочне уявлення процесів розгортання операцій нормального польоту СНП спеціальними циклограмами, складний вид таких циклограм розгортання переконливо доводить той факт, що виконання нормального польоту та його етапів на СНП є гранично складною процедурою прийняття рішень для членів екіпажу, тому що сам процес польоту ІЛ-96-300 в нормальних умовах експлуатації гранично складний через складність внутрішніх процесів розгортання рахункових операцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хохлов Е.М., Али Аль-Аммори. Авторский процессный подход (авторский взгляд на первое десятилетие внедрения процессного подхода в глобальном масштабе 1995-2005 г.г. К.: Издательский дом «Компьютерпресс, 2010. 176 с.
2. Скрипец А.В., Али Аль-Аммори, Хохлов Е.М. Процессная концепция анализа ошибок летных экипажей по СУ самолетов нового поколения на начальном этапе эксплуатации. *Авиошляховик України*. 2007. № 10. С. 112-116.
3. Аль-Аммори Али. Процессный подход до забезпечення ефективності інформаційно-керуючих систем повітряних суден. *Вісник НАУ*. 2008. № 10. С. 97-99.
4. ИЛ-96-300. Руководство по летной эксплуатации в 3-х книгах. М.: АК им. С.В. Ильюшина, 1992, 878 с.
5. Boeing -747-400. Airplane flight manual: part 1 and 2.
6. Программы летного обучения на самолетах ТУ-154, ТУ-134, ИЛ-86, ЯК-42, АН-24.

Received (Надійшла) 24.02.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.05.2022

Information-factor technologies for deployment the prediction at the stage of operation of new aircraft generation

Ali Al-Ammory, Arsen Klochan, Anastasia Degtyareva, Hasan Al-Ammory, Natalia Poleva

Abstract. The purpose of this article is the development of information-factor deployment technologies at the operation stage of new-generation aircraft to reduce crew errors during their control. The article considers information-factor technologies for predicting potential emergency statistics caused by human factor for aircraft in the initial stage of operation. This is achieved by selecting an analog aircraft based on deployment coefficients from a family of aircraft that have many years of operation, as well as representative and respectable statistics of accidents caused by human factor. Such forecasting will allow to remove and reduce the part of human factor in emergency statistics by justifying existing training programs for flight crews with the transition to qualitatively new principles of flight crew training and also by using the capabilities of next-generation aircraft as a flying automated electronic complex.

Keywords: deployment the prediction, information-factor technologies, emergency statistics, a new-generation aircraft, flight crew training program, flight technology.

О. Ч. Огоро, М.Ю. Заліський, А.О. Осіпчук, С.О. Дмитрієв

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

СТАТИСТИЧНІ ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Анотація. Програми технічного обслуговування повітряних суден розробляються на основі рекомендацій виробника та виконання директив регулятора з льотної придатності. Однак експлуатанти мають адаптувати свою програму технічного обслуговування у відповідності до конфігурації повітряного судна та індивідуальних вимог свого парку. Результати аналізу надійності дозволяють скоригувати програму технічного обслуговування й тим самим скоротити надмірно дорогі дороговартісні дії з технічного обслуговування та час простою. Ця стаття присвячена використанню теорії ймовірності та статистичної обробки для оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден. У роботі отримана статистична імітаційна модель відмов систем та конструкцій літаків та вертольотів методом Монте-Карло. В якості початкових даних для моделювання були використані параметри надійності систем і конструкцій повітряних суден. Запропонована модель може бути використана для вдосконалення структур систем та конструкцій повітряних суден на етапі проектування та виробництва.

Ключові слова: оптимізація, надійність, технічне обслуговування, прогностичне обслуговування, експлуатація, модель відмов авіаційних систем.

Вступ

Прогнозується, що світовий ринок комерційних вертольотів матиме річний темп зростання 2% у продовж 2020–2025 років [1]. Зростання ринку є очевидним у нафтовидобувних регіонах Близького Сходу та Африки, де сектор комерційних вертольотів робить внесок в економіку, виконуючи пошуково-рятувальні послуги та транспортування до морської нафтогазової промисловості [2]. Незважаючи на прибуток від комерційних польотів повітряних суден (ПС) для цих країн, їх середня експлуатаційна вартість може перевищувати початкову ціну придбання в 10 разів; технічне обслуговування, ремонт і капітальний ремонт оцінюються приблизно в 10-15% від експлуатаційних витрат [3]. Досить висока вартість обслуговування обумовлює необхідність

проведення оптимізації для підвищення надійності та безпеки польотів.

Мотивація та постановка проблеми

Життєвий цикл будь-якої систем або конструкцій повітряних суден складається з чотирьох основних етапів. *Першим етапом* є проектування та розроблення, що складається з планування та концептуального проектування, попереднього проектування і системної інтеграції, а також детального проектування. *Другим етапом* є стадія виробництва та/або виготовлення. *Третій етап* – це експлуатація, та завершальний, четвертий – утилізація.

Як видно з рис. 1, найбільшими витрати є на стадії експлуатації; на технічне обслуговування, ремонт і капітальний ремонт припадає 10-15 % цих витрат.

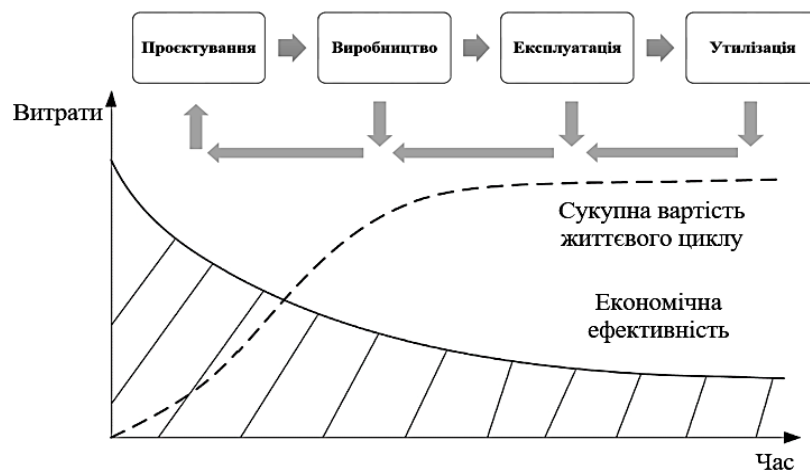


Рис. 1. Життєвий цикл авіаційних систем та його вплив на витрати [4]

Технічне обслуговування ПС можна визначити як сукупність усіх технічних і адміністративних дій, які підтримують або відновлюють компоненти ПС, підсистеми, системи та структури в стані, в якому вони можуть виконувати свої заздалегідь визначені функції.

Цілі технічного обслуговування повітряних суден можна коротко сформулювати як:

- 1) забезпечення готовності повітряних суден;
- 2) забезпечення надійності систем повітряних суден;
- 3) забезпечення безпеки польотів.

Прямі витрати на технічне обслуговування включають матеріали, обладнання, устаткування, постачання запасних частин, персонал та інше, в той час як непрямі витрати на технічне обслуговування пов'язані з адміністративним та управлінським персоналом, накладними витратами та втратою доходу через простій ПС. Технічне обслуговування ПС – це загальний термін для перевірок ПС з метою їх оцінки та оцінки стану складових частин і систем. Технічне обслуговування включає короткі передпольотні або детальні перевірки.

Дії з технічного обслуговування систем і конструкцій повітряних суден класифікуються як: коригуюче обслуговування, запобіжне обслуговування та прогностичне обслуговування. Коригуюче обслуговування охоплює всі дії з ремонту непередбачуваних несправностей і відмов. Дії з профілактичного обслуговування зменшують кількість незапланованих ремонтів. Вони складаються з періодичних заходів щодо технічного обслуговування, яке проводиться для уникнення відмов та виходу з ладу компонентів і систем [5]. Прогностичне обслуговування використовує ряд параметрів для припущення, коли станеться відмова, з метою зменшення кількості непередбачуваних збоїв та забезпечення персоналу надійними варіантами планування профілактичного обслуговування.

Витрати на технічне обслуговування значною мірою залежать від надійності систем ПС. Максимальна готовність ПС та мінімізація витрат найкраще досягаються на етапі його проектування із забезпеченням високих показників надійності та ремонт придатності. Таким чином, вимоги до надійності загалом визначаються на етапі проектування та розробки життєвого циклу авіаційної системи та застосовуються на інших трьох етапах життєвого циклу.

Для практичних задач надійність визначається як здатність компонента, підсистеми або системи працювати за призначенням без будь-яких збоїв та у визначених межах ефективності протягом визначеного інтервалу часу. З кількісної точки зору, надійність зазвичай оцінюється як ймовірність того, що пристрій буде виконувати свою функцію протягом необхідного періоду часу в очікуваних умовах експлуатації та навколишнього середовища [6]. Для аналізу надійності оцінюють ймовірність відмови складових частин, підсистем або систем за наявних випадкових подій. Математично це здійснюється за допомогою випадкових величин, що використовуються для моделювання різноманітних джерел несправностей у виробках та процесах. Аналіз надійності є основою для технічного обслуговування за станом, який згідно стандарту Міжнародного Електротехнічного Комітету (International Electrotechnical Commission IEC) № 60300–3–11 визначається як «метод ідентифікації та вибору політики керування відмовами для досягнення необхідного рівня безпеки, доступності та економічності експлуатації результативно та ефективно» [7]. Це здійснюється на основі а) статистичних розрахунків і розрахунків надійності роботи системи та б) основних компонентів профілактичного обслуговування, ремонту та

заходів утилізації. Технічне обслуговування за станом планується для майбутнього обслуговування на основі поточного технічного стану системи. Воно надає інформацію для планування превентивних заходів з профілактичного та прогностичного обслуговування.

Огляд літератури показує, що значна увага приділяється дослідженням розвитку стратегій технічного обслуговування з контролем надійності, однак існують прогалини в розробці математичних моделей для визначення характеристик надійності авіаційних систем з точки зору оптимізації технічного обслуговування ПС. В роботі [8] було розроблено модель надійності електронних компонентів вітрогенераторів. Протягом експлуатації вітрогенераторів були зібрані дані, на основі яких була побудована гістограма, що показана на рис. 2. Робота [8] підкреслила доцільність розробки моделей надійності для інших складних систем, а її результати застосовуються до авіаційних систем і конструкцій.

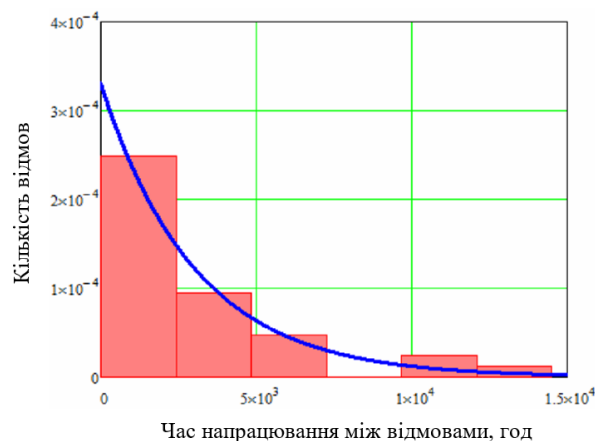


Рис. 2. Функція щільності розподілу ймовірності часу напрацювання між відмовами вітрогенераторів

Статистичне моделювання

Для виконання різних типів технічного обслуговування та досліджень надійності використовуються різні математичні моделі розподілів ймовірностей. Найбільш використовуваним розподілом ймовірності на етапі експлуатації є експоненційний розподіл, оскільки його можна застосовувати в різних типах аналізу інтенсивності відмов компонентів, підсистем і систем протягом їхнього терміну служби. Щільність розподілу ймовірності для експоненційного розподілу визначається як

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ для } t \geq 0, \lambda > 0,$$

де t – час, $f(t)$ – щільність розподілу ймовірності, λ – параметр розподілу, який в теорії надійності є інтенсивністю відмов, що зберігає постійне значення на етапі нормальної експлуатації [9].

Метод моделювання Монте-Карло передбачає використання випадкових чисел та може бути застосований для вирішення таких стохастичних задач як моделювання випадкових відмов, тому й був обраний для даного дослідження. Реальні дані були отримані з польотних і технічних журналів за чоти-

рірничний період експлуатації флоту ПС [10]. Спостережуваний час t , який є сумою льотних годин кожного ПС флоту за вказаний інтервал часу, був взятий зі звіту про використання, а дані про несправності систем ПС були отримані з технічного журналу ПС. Системи ПС були класифіковані за допомогою системи нумерації АТА, яка є всесвітнім стандартом для визначення та структурування всіх секцій сучасних пасажирських літаків.

Інформація про несправності авіаційних систем і конструкцій ПС наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Дані про відмову систем і конструкцій ПС

АТА №	Назва розділу АТА	n_i	n_F
21	Система кондиціонування повітря	11	3
22	Система автоматичного управління польотом	104	49
23	Система зв'язку	39	12
24	Система електроживлення	57	20
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	27	2
26	Система протипожежного захисту	15	
28	Паливна система	9	3
29	Гідрравлічна система	46	3
30	Система захисту від льоду та дощу	14	4
31	Прилади індикації/запису	31	18
32	Шасі	211	16
33	Освітлення та світлова індикація	76	16
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	173	91
39	Електричні - електронні панелі та багатоцільові компоненти	9	2
45	Бортова система обслуговування	17	1
51	Конструкція планера	70	3
52	Двері, люки	53	7
53	Фюзеляж	165	21
55	Стабілізатори	13	
56	Вікна	4	
65	Приводи хвостового гвинта	192	8
66	Складані лопаті	37	4
67	Система управління роторами	76	12
71	Силова установка	24	2
72	Двигун	20	6
73	Паливна система двигунів	48	16
74	Система запалювання	1	
75	Система відбору повітря	54	18
76	Система керування двигуном	5	1
77	Прилади контролю двигуна	8	6
78	Система вихлопу двигуна	4	
79	Масляна система	48	1
80	Система запуску	15	3
Сукупна кількість спостережуваних відмов за вказаний інтервал		1676	348

В табл. 1 n_F характеризує відмови під час польоту, тоді як n_i визначає загальну кількість відмов, помічених як пілотами, так і персоналом технічного

обслуговування протягом спостережуваного інтервалу часу за чотири роки.

Час спостереження $T_{obs} = 29116$ годин польоту та загальна інтенсивність відмов для будь-якого довільного компонента ПС $\lambda = 0.058 \text{ год}^{-1}$. Це означає, що відмови в середньому відбуваються після 17 годин польоту.

Для моделі проведено аналіз $M = 1000$ відмов систем. Час між відмовами визначається експоненціальним розподілом із параметром λ і вважається, що лише одна відмова може виникнути в один елементарний інтервал спостереження. Щоб визначити, яка система ПС вийшла з ладу, було обчислено певну кількість відмов на всю систему. В загальному, це значення визнає умовну ймовірність відмови даної системи, якщо певна система вийшла з ладу, та розраховується за формулою

$$p_i = \frac{n_i}{N},$$

де N – загальна кількість спостережуваних відмов, $i \in [1, 32]$.

Було згенеровано випадкові числа з рівномірним розподілом в діапазоні $[0; 1]$ та розміром вибірки 10000.

Кожне згенероване число далі порівнюється з системою порогових значень. Тридцять три одиничні порогові значення були визначені до початку моделювання за допомогою наведеної нижче формули ($p_0 = 0$):

$$V_j = \sum_{i=0}^j p_i.$$

Алгоритм прийняття рішення про збій системи наступний. Якщо значення згенерованого числа x_k потрапляє в інтервал $[V_j; V_{j+1}]$, то вважаємо, що $j+1$ система ПС вийшла з ладу.

В результаті 10000 повторень алгоритму прийняття рішень формуються вектори відмов \bar{T}_i для кожної системи. Для кожної системи оцінюються характеристики випадкових величин та будується й аналізується функція щільності розподілу ймовірності.

Алгоритм статистичного моделювання, виконаного за допомогою програмного забезпечення Mathcad, показано на рис. 3.

Аналіз результатів моделювання

Отримана щільність розподілу ймовірності часу напрацювання між відмовами для систем кондиціонування повітря, автоматичного управління польотом, зв'язку та електроживлення ПС наведена відповідно на рис. 4 – 7.

Для одного із варіантів результатів моделювання для різних систем, що показані на рис. 4 – 7, подальший аналіз проводився за допомогою функцій Mathcad і Microsoft Excel. Були отримані результуючі ймовірності відмов і середній час між відмовами.

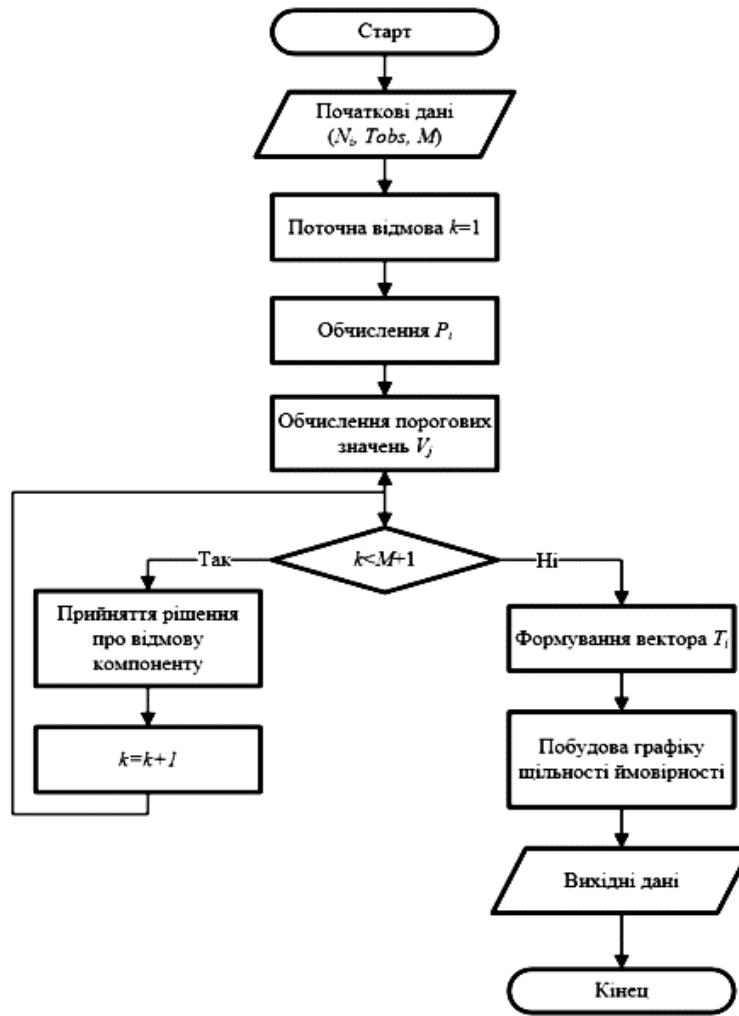


Рис. 3. Блок-схема алгоритму моделювання



Рис. 4. Функція щільності розподілу ймовірності часу напрацювання між відмовами системи кондиціонування повітря

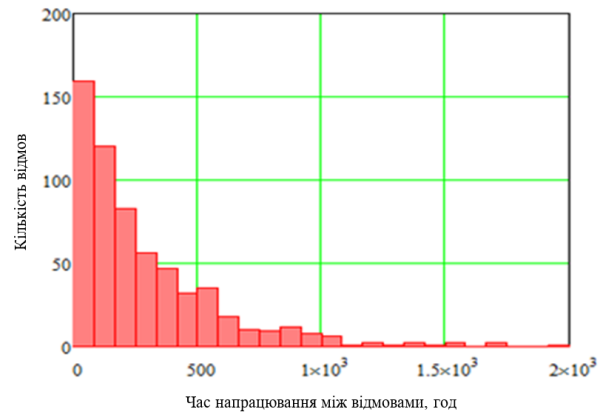


Рис. 5. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи автоматичного управління польоту

На кожні 10 000 годин польоту спостерігалось 64 відмови в системі кондиціонування повітря, 607 – в системі автоматичного управління польотом, 236 – в системі зв'язку і 362 – в системі електроживлення. Середній час між відмовами та стандартні відхилення наведені в табл. 2.

На основі цих результатів можна розрахувати статистику відмов інших систем і конструкцій ПС після побудови функції щільності ймовірності системи або конструкцій.

Таблиця 2 – Середній час напрацювання на відмову систем ПС

Система	Середній час напрацювання на відмову
Кондиціонування повітря	2,705
Автоматичний політ	285
Зв'язок	732
Електроживлення	475

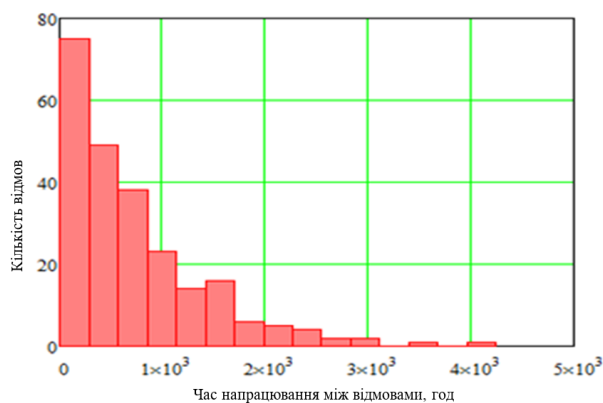


Рис. 6. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи зв'язку

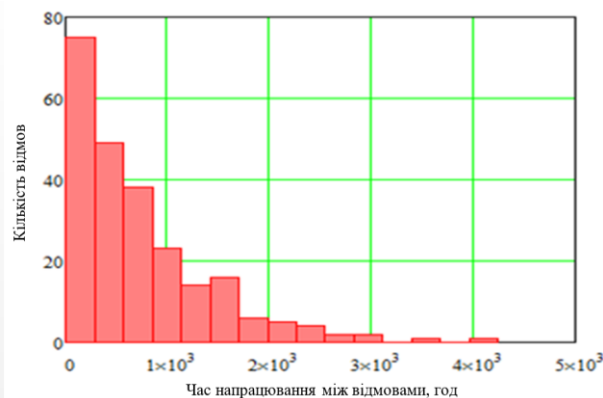


Рис. 7. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи електроживлення

Висновок

У статті розглядається статистична імітаційна модель відмов систем і конструкцій ПС з огляду на оптимізацію технічного обслуговування ПС. Для моделювання відмов використовувався метод моделювання Монте-Карло.

Для визначення функцій щільності ймовірності чотирьох систем ПС – кондиціонування повітря, автоматичного польоту, зв'язку та електроживлення – було застосовано моделювання. За допомогою розглянутого в цій статті алгоритму може бути

розрахована статистика відмов інших систем і конструкцій ПС. Враховуючи, що запропоновану модель можна використовувати для визначення ймовірності відмови систем і конструкцій ПС, її потенційно можуть використовувати експлуатанти повітряних суден для планування профілактичних і прогностичних дій з технічного обслуговування.

Отримані результати також потенційно можуть бути використані під час проектування нових систем і для вдосконалення існуючих систем, оскільки вимоги до надійності визначаються на етапі проектування та розробки життєвого циклу системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Global Commercial Helicopters Market (2020 to 2025). Growth, Trends and Forecast – ResearchAndMarkets.com. URL <https://www.businesswire.com/news/home/20200909005517/en/Global-Commercial-Helicopters-Market-2020-to-2025---Growth-Trends-and-Forecast---ResearchAndMarkets.com>.
2. Global Helicopter Market Industry Analysis and Forecast (2019-2027) by Product type, by Application and by Region – Maximize Market Research PVT. Ltd. URL <https://www.maximizemarketresearch.com/marketreport/global-helicopter-market/15356>.
3. Sprong, J. P., Jiang, X., & Polinder, H. (2019). A Deployment of Prognostics to Optimize Aircraft Maintenance - A Literature Review: A Literature Review. *Annual Conf. of the PHM Society*, 11(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2019.v11i1.776>.
4. Ren H., Chen X., Chen Y. Reliability Based Aircraft Maintenance Optimization and Applications. Academic Press. 2017, pp. 1–3. DOI: [10.1016/B978-0-12-812668-4.00001-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812668-4.00001-0).
5. Wu H., Liu Y., Ding Y., Liu J. Methods to reduce direct maintenance costs for commercial aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2004, Vol. 76 No. 1, pp. 15–18. <https://doi.org/10.1108/00022660410514964>.
6. Nakagawa T.. Maintenance Theory of Reliability. 2005, 269 p.
7. IEC 60300-3-11, Dependability Management – Part 3-11: Application Guide - Reliability centred maintenance, 1999.
8. Zaliskyi M., Petrova Y., Asanov M., Bekirov E. Statistical Data Processing During Wind Generators Operation. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, Vol. 8 (1), 2019, pp 33–38. <http://dx.doi.org/10.18178/ijeetc.8.1.33-38>.
9. Dhillon B. S. Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers. New York, Taylor & Francis Group. 2006, 214 p. <https://doi.org/10.1201/9781420006780>.
10. Okoro O.C. Reliability Analysis of Aircraft Fleet in Nigeria. *Proceedings of National Aviation University*. 2020, Vol. 83 (2), pp.49–53.

Received (Надійшла) 24.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

Statistical simulation models for the optimization of aircraft maintenance

Onyedikachi Chioma Okoro, Maksym Zaliskyi, Serhii Dmytriiev, Alina Osipchuk

Abstract. Aircraft maintenance programs are developed based on manufacturer recommendations and compliance with airworthiness regulator directives. However, operators must adapt their maintenance program to the aircraft configuration and individual requirements of their fleet. The results of the reliability analysis make it possible to adjust the maintenance program and thus reduce excessively expensive maintenance work and downtime. The use of probability theory and statistics to optimize aircraft maintenance was considered. The article presents the developed statistical simulation model of failures of aircraft systems and structures based on the Monte Carlo method. Reliability parameters of aircraft systems and structures were used as initial data for the simulation. The obtained model can be used to improve of aircraft systems and structures at the design and production stage.

Keywords: optimization, reliability, maintenance, predictive maintenance, operation, failure model of aviation systems.

С. С. Войтенко^{1,2}, О. П. Барвінський¹, О. О. Бабич², В. В. Мошаренков²

¹ Державне підприємство “Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації”, Харків, Україна

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

РОЗГЛЯД ВИМОГ EN ISO/IEC 17025 СТОСОВНО КАЛІБРУВАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ В ЧАСТИНІ ПРОЦЕСІВ ВАЛІДАЦІЇ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Анотація. В статті розглядається один із варіантів валідації методів калібрування засобів вимірювальної техніки калібрувальною лабораторією, наводяться обґрунтування щодо обраного підходу. Розглянуто порядок оцінювання метрологічної простежуваності, діапазону та невизначеності вимірювання, а також оброблення отриманих експериментальних даних з метою оцінювання зсуву методу калібрування. Все це сприятиме в подальшому формуванню єдиного підходу та спільного розуміння визначених процесів.

Ключові слова: валідація, метод, калібрування, калібрувальна лабораторія, оцінювання, метрологічна простежуваність, діапазон вимірювання, невизначеність результатів вимірювання.

Вступ

Постановка проблеми. Під час військової агресії російської Федерації в Збройних Силах України почали поступаючим зразки озброєння та військової техніки іноземного виробництва. В подальшому ці зразки будуть потребувати технічного обслуговування, в тому числі метрологічного. Як що метрологічним обслуговуванням займається особовий склад, який їх використовує і він проходить навчання, то з метрологічним забезпеченням цих зразків можуть виникнути труднощі. Деякі питання будуть стояти дуже гостро. Перше: чи зможе система метрологічного забезпечення Збройних Сил України за допомогою існуючого парку засобів вимірювальної техніки забезпечити надійне функціонування зразків озброєння військової техніки (ОВТ). Друге: як швидко будуть розроблені та валідовані методи калібрування обладнання зразків озброєння та військової техніки іноземного виробництва. Третє: можливість та необхідність залучення Державних підприємств Міністерства Економіки до калібрування засобів вимірювальної техніки (обладнання ОВТ) іноземного виробництва. Слід зазначити, що Уряд України ще в 2020 р. визначив один із основних напрямків діяльності – це лібералізація торгівлі України та ЄС у рамках поглибленої та всеохоплюючої зони вільної торгівлі, у тому числі зняття торговельних бар'єрів у торгівлі: вжиття заходів по укладенню Угоди про оцінку відповідності та прийнятності промислових товарів; активізація подальшої секторальної інтеграції України з ЄС за підтримки ЄС та держав-членів ЄС [1]. В Україні були розпочаті роботи попередніх оцінювальних місій ТАІЕХ Європейської Комісії у рамках підготовки України до надання їй «промислового безвізу». Одним з питань, що оцінювалась стосовно метрологічної діяльності це організація процесу калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), починаючи з акредитації каліб-

рувальної лабораторії (КЛ). Слід зазначити, що члени Європейської Комісії в своїх звітах зазначали про необхідність удосконалення перекладів документів ЄС та їх впровадження. Нова редакція ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 [2] гармонізованого з міжнародним стандартом EN ISO/IEC 17025:2017 потребує системного впровадження всіма КЛ.

Реалізація вимог кожного розділу та пункту цього стандарту для кожної КЛ обов'язкова. У варіантах реалізації їх не обмежують, але під час акредитації Національним агентством з акредитації України вимагають надання доказової бази щодо виконання вимог. При цьому щодо адекватності та достатності доказової бази не завжди думки експертів співпадають з думками керівництва КЛ. Одною з вимог, навколо якої є непорозуміння – це валідація методів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [3] дуже слушно зазначили: «Аналіз національних нормативних метрологічних документів та публікацій міжнародних й регіональних організацій з акредитації та організацій, компетенцією яких є лабораторна практика, показав, що в основному публікації стосовно питань валідації (оцінювання придатності) стосуються методів випробування (МВ) перелічувати всі роботи в цьому напрямку сенсу немає.

Нажаль з того часу нічого не змінилось, особливості методів калібрування (МК) практично не розглядаються, а якщо згадуються, то без розкриття їх специфіки.

Метою статті є вдосконалення системи метрологічного забезпечення Збройних Сил України (ЗСУ), на першому етапі переозброєння ЗСУ зразками ОВТ іноземного виробництва, шляхом спрощення процесу валідації методів калібрування ЗВТ (в тому числі обладнання ОВТ іноземного виробництва) та надання можливостей Державним підприємствам Міністерства Економіки в короткий термін долучитися до системи метрологічного забезпечення ЗСУ без порушення вимог EN ISO/IEC 17025.

Виклад основного матеріалу

Виділимо сформовані уявлення, якими може бути обумовлена недостатня увага до питань валідації МК [3]:

А. Методи калібрування не мають ніяких особливостей валідації порівняно з методами випробування.

Це твердження є сумнівним, адже можна легко навести приклади таких особливостей. Наприклад, однією з найпоширеніших характеристик, яка досліджується для МВ, є збіжність методу. Однак для МК ЗВТ з істотною випадковою похибкою дослідження цієї характеристики не має сенсу, оскільки в цьому випадку збіжність є характеристикою об'єкта калібрування, а не його методу. Тому, швидше за все, причина полягає в наступній причині:

Б. Оскільки в КЛ працюють метрологи, вони спроможні, спираючись на професійні знання і досвід, самостійно визначити особливості валідації МК.

Разом з тим, якщо проаналізувати ситуацію в Україні, вітчизняні КЛ практично не мають досвіду відповідної роботи, що створює певні проблеми.

В [4] автор теж констатував, що між випробуванням та калібруванням є суттєві розбіжності.

Тому спробуємо, самостійно визначити особливості валідації методів калібрування.

Спочатку розглянемо визначення термінів «випробування» та «калібрування».

В [2] застосовують терміни та визначення понять відповідно до [5, 6]. Застосовуючи згідно з [5]

терміни та визначення понять методика; процедура, а також випробування, визначення випробування можна конкретизувати таким чином:

Випробування – визначення однієї чи кількох характеристик матеріалів, продукції чи процесів для оцінювання відповідності згідно з процедурою (методикою).

З розгляду цього визначення очевидно, що:

а) мета випробування – визначення характеристик матеріалів, продукції чи процесів для оцінювання відповідності;

б) визначення (в тому числі вимірювання) характеристик наводиться випробувальною лабораторією (ВЛ) згідно з МВ.

Термін калібрування українською краще сформульований не в [6], а в [7]. Згідно з цим визначенням, мета калібрування – отримання результату вимірювання з показу, тобто – одного вимірюваного значення величини та невизначеності вимірювання.

З розгляду визначень термінів «випробування» та «калібрування» випливає, що мета калібрування не співпадає з метою випробування та не пов'язана з її досягненням безпосередньо.

Процес калібрування можна назвати важливою автономною (тобто, згідно з [8] – самостійною, незалежною у розв'язанні певних питань) складовою процесу випробування. Для ілюстрування ролі калібрування ЗВТ в отриманні результату вимірювання при випробуванні дуже наочним є рисунок 1 зі статті [9]:



Рис. 1. Внесок складових у невизначеність результату вимірювання при випробуванні

Оскільки мета калібрування не співпадає з метою випробування, то за змістом МК є відмінними від МВ. Відповідно, для МВ та МК може бути відмінною застосовність робочих характеристик з переліку, вказаного в [2], які при валідації МВ та МК мають підлягати дослідженням.

Оскільки калібрування проводять для досягнення мети випробування, то для забезпечення узгодженості випробування та калібрування умови застосування МК мають визначатися умовами застосування МВ.

В [4] звертають увагу: «З визначення калібрування випливає, що вимірювальними величинами при калібруванні (для величини X_S , яка вимірюється (відтворюється) еталонними ЗВТ з розширеною невизначеністю U_S) можуть бути: X_C – величина, що вимірюється (відтворюється) ЗВТ, що калібрується; Δ – систематична похибка ЗВТ, що калібрується. Усі ці величини визначаються з розширеною невизначеністю U_C . Слід зазначити, що вказані величини отримують при «визначених умовах», під якими розуміємо:

- заданий діапазон значень еталонної величини X_S ;
- заданий діапазон змінювання факторів впливу (наприклад, діапазон частот напруги при вимірюванні електричного опору на змінному струмі);
- визначені замовником умови навколишнього середовища (температура та відносна вологість повітря, атмосферний тиск).

При цьому будуть змінюватися значення вимірюваних величин та їх розширена невизначеність U_C .

Згадані «визначені умови» – це умови калібрування ЗВТ, вказані ВЛ для КЛ за яких воно застосовується. Фактично це мають бути умови застосування МВ.

Згідно з [2] ВЛ мають «продемонструвати, що вони діють компетентно та здатні отримувати достовірні результати». Для цього, зокрема:

а) ВЛ мають ідентифікувати і врахувати складові невизначеності вимірювання та обчислити невизначеність вимірювання згідно з МВ.

Ці вимоги будуть виконані, якщо:

- 1) для випробувань буде використана валідова-

на МВ. В [10] вказано, що «Методи в національних або міжнародних стандартах слід вважати валідованими». Використання валідованого МВ означає, що ВЛ вже встановила, що, за встановлених умов, ЗВТ, що підлягають калібруванню, відповідають валідаційним вимогам до МВ. Таким чином, при калібруванні в КЛ згідно з її МК мова йде лише про оцінювання певних характеристик конкретного ЗВТ;

2) для обчислення невизначеності результату вимірювання згідно з МВ (рис. 1), ВЛ зможе оцінити складову невизначеності, обумовлену ЗВТ, яке застосовується згідно з МВ. Для цього ВЛ необхідна оцінка складової невизначеності вимірювання за допомогою цього ЗВТ.

Щоб отримати оцінку вказаної складової від КЛ в результатах калібрування (сертифікати калібрування), спочатку компетентна КЛ за своїм валідованим МК за вказаних умов калібрує згадані ЗВТ (тобто – отримує оцінки «невизначеності вимірювання для всіх калібрувань»).

б) ВЛ має встановити та підтримувати метрологічну простежуваність результатів вимірювання.

Результати калібрування лабораторій, що відповідають [2] забезпечують метрологічну простежуваність. Тобто, калібрування в КЛ відповідного ЗВТ для ВЛ є доказом метрологічної простежуваності випробувань.

Виходячи з викладеного вище, а також основних принципів валідації, вказаних в [10], прийоми, що використовуються для валідації МК ЗВТ, можуть бути одним із або поєднанням таких:

а) калібрування з використанням еталонів або референтних матеріалів (РМ);

б) міжлабораторні порівняння;

в) оцінювання невизначеності результатів вимірювання на основі розуміння теоретичних принципів методу вимірювання та практичного досвіду.

Робочі характеристики валідованих МК, оцінених для належного застосування, мають відповідати потребам замовників і встановленим вимогам.

Спираючись на [10], що «обсяг (валідації) завжди слід вибирати з урахуванням передбачуваного використання результатів», валідація МК ЗВТ має здійснюватися шляхом валідаційних досліджень таких характеристик:

- метрологічна простежуваність;
- діапазон вимірювання;
- невизначеність вимірювання;
- зсув вимірювання.

Для валідації МК ЗВТ можуть бути використані еталони, ЗВТ лабораторії або ЗВТ, що надійшли на калібрування.

Валідація МК ЗВТ має проводитись на етапі його розроблення та на основі експериментальних даних, отриманих в результаті калібрування ЗВТ згідно з МК, що валідується. Результати вимірювань, отримані при калібруванні ЗВТ, заносяться безпосередньо до протоколу первинних даних.

Процес валідації МК наведено на рис. 2.

Розглянемо порядок оцінювання метрологічної простежуваності, діапазону та невизначеності вимірювання, а також оброблення отриманих експериментальних даних з метою оцінювання зсуву МК.

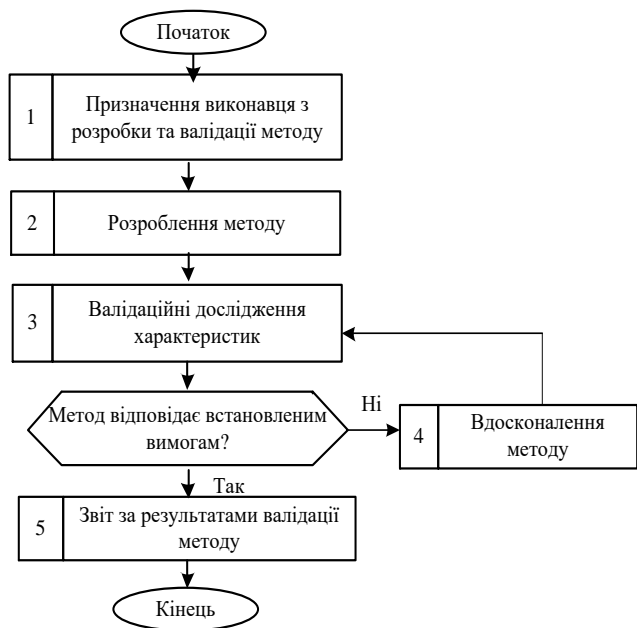


Рис. 2. Блок-схема процесу валідації методу калібрування ЗВТ

Оцінювання метрологічної простежуваності. На самому початку етапу розроблення МК мають бути проведені:

- а) визначення вимірюваної величини;
- б) обрання методу вимірювання;
- с) пошук придатних для застосування в МК еталонів (РМ).

На етапі валідації МК має бути проведено:

- а) уточнення вимірюваної величини;
- б) уточнення обраного методу вимірювання;
- с) оцінювання метрологічної простежуваності характеристик знайдених для застосування в МК еталонів (РМ), базуючись на вимогах, способах забезпечення та шляхах демонстрування, вказаних в [2, 11-13].

Після валідації – вимірювана величина, метод вимірювання та відомості щодо метрологічної простежуваності наводять в відповідному розділі МК.

Результати оцінювання метрологічної простежуваності визнають задовільними, а МК – придатним, якщо згідно з вимогами [2], метрологічну простежуваність до відповідної основи для порівняння встановити вдалося.

За незадовільних результатів оцінювання метрологічної простежуваності має бути переглянуто обраний метод вимірювання або знайдені інші еталони (РМ) для його реалізації. Після цього валідацію повторюють.

Оцінювання діапазону вимірювання. На етапі розроблення МК має бути проведено:

- а) визначення типів ЗВТ, які потрібно калібрувати;
- б) визначення діапазону вимірювання та додаткових параметрів, якщо застосовно.

На етапі валідації МК має бути проведено:

- а) уточнення типів ЗВТ, які потрібно калібрувати;
- б) перевірка правильності визначення діапазону вимірювання та переліку наведених додаткових параметрів.

Після валідації – типи ЗВТ, що підлягають калібруванню та діапазон вимірювання наводять у відповідному розділі МК.

Результати дослідження діапазону вимірювання наводять у відповідному розділі протоколу і визнають задовільними, а МК – придатним, якщо:

- а) виконані вимоги зазначені вище;
- б) обрані еталони дозволяють отримати опорні значення вимірюваної величини на початку, в середині та в кінці зазначеного діапазону вимірювання.

За незадовільних результатів оцінювання діапазону вимірювання має бути переглянуто обраний діапазон вимірювання або знайдені інші еталони (РМ) для його реалізації. Після цього повторюють валідацію МК з самого початку (якщо був змінений склад попередньо обраних еталонів (РМ)).

Оцінювання невизначеності вимірювання проводиться на основі розуміння теоретичних принципів методу вимірювання та практичного досвіду його застосування.

В МК вказують невизначеність вимірювання, а саме:

U_{\min} – мінімальна невизначеність вимірювання, на яку може очікувати лабораторія під час калібрування; цільова невизначеність U_T .

Оцінювання U_{\min} має бути проведене на етапі розробки МК згідно з [13]. Як довідковий матеріал при оцінюванні може бути корисним джерело [14], але цим не обмежено.

Оцінювання U_T має бути проведене на етапі розробки МК. Під час розрахунку U_T необхідно взяти до уваги:

- а) вимоги до ЗВТ, що підлягають калібруванню згідно з МК,
- б) значення MPE ЗВТ, що підлягають калібруванню. Згідно з рекомендаціями [15]:

$$U_T \leq f \times MPE, \quad (1)$$

де $f = 0,2$ або $0,33$.

Результати дослідження невизначеності вимірювання наводять у відповідному розділі протоколу і визнають задовільними, а МК – придатним, якщо виконується вимога $U_{\min} \leq U_T$.

За незадовільних результатів оцінювання невизначеності вимірювання має бути переглянутий метод вимірювання або обирають інші еталони (РМ) для його реалізації. Після цього повторюють валідацію МК з самого початку.

Оцінювання зсуву вимірювання проводиться шляхом калібрування з використанням еталонів (РМ). За експериментальними даними з протоколу первинних даних при калібруванні, для кожної точки калібрування, згідно з [16] обчислюють число E_n , що характеризує

статистичну значущість зсуву, за формулою:

$$E_n = |X_{lab} - X_{ref}| / \sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}, \quad (2)$$

де X_{lab} та U_{lab} – значення, отримане в результаті калібрування, та розширена невизначеність вимірювань при калібруванні; X_{ref} та U_{ref} – значення та його розширена невизначеність приписані еталону.

Результати дослідження зсуву вимірювання документуються протоколом і визнаються задовільними, а МК – придатним, якщо $E_n \leq 1,0$.

Бюджет розширеної невизначеності U_{lab} підлягає аналізу при незадовільних результатах оцінювання зсуву, а МК – коригуванню. До бюджету мають бути додані невраховані складові невизначеності, наприклад:

а) згідно з рекомендаціями [17] – абсолютне значення різниці Δ між $\overline{X_{lab}}$ та X_{ref} :

$$\Delta = |\overline{X_{lab}} - X_{ref}|, \quad (3)$$

де $\overline{X_{lab}}$ – середнє значення, отримане в результаті калібрування.

б) складова, що виникає внаслідок наявності кореляції між еталонами (РМ).

Після цього повторюють оцінювання невизначеності та зсуву вимірювання скоригованої МК.

За результатами валідації оформлюють зведений звіт. Якщо результати валідації МК за наведеними процедурами оцінювання визнані задовільними, то цей МК ЗВТ вважається придатним для використання в цілому.

Висновок

Використання описаного варіанту валідації розробленого або модифікованого калібрувальною лабораторією методу калібрування ЗВТ дозволить стосовно цього питання:

- реалізувати вимоги [2] для кожної калібрувальної лабораторії;
- надати достатню та адекватну цілям калібрування доказову базу щодо виконання вимог [2];
- надавати з боку КЛ для ВЛ надійні докази для реалізації ними вимог [2];
- зробити процес валідації МК ЗВТ більш зрозумілим, прозорим та менш трудомістким;
- застосовувати валідацію МК ЗВТ як потужний інструмент для розвитку та удосконалення цих методів;
- залучити Державні підприємства Міністерства Економіки України в короткий термін до системи метрологічного забезпечення ЗСУ без порушення вимог EN ISO/IEC 17025.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Програми діяльності Кабінету Міністрів України : Постанова України від 12 черв. 2020 р. № 471. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/471-2020-%D0%BF#Text> (дата звернення: 20.02.22).
2. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT)
3. Коцюба А. М., Домницька В. К., Коцюба Л. Г. Валідація методик калібрування. *Стандартизація сертифікація як-ість*. 2016. № 1. С. 41-45. URL: <http://tc.terminology.lp.edu.ua/> (дата звернення 20.02.2022).

4. Захаров И. П. Калибровка-17025: справ. пособ. 3-е изд., перераб. и дополн. Харьков, 2018. 80 с. URL: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/18974/1/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B0-17025_17025.pdf (дата звернення 20.02.2022).
5. ДСТУ ISO/IEC 17000:2007 Оцінювання відповідності. Словник термінів і загальні принципи (ISO/IEC 17000:2004, IDT) вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 26 с. URL: https://quality.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2018/04/dstu_iso_iec_17000_2007.pdf (дата звернення 20.02.2022).
6. JCGM 200:2012. Міжнародний словник з метрології. Основні й загальні поняття та пов'язані з ними терміни (VIM). Вид. 3-тє. Київ: Мінекономрозвитку України, 2017. 69 с. URL: <https://www.oiml.org/en/publications/other-language-translations/ukrainian/v001-ua13.pdf> (дата звернення 20.02.2022).
7. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 15 січ. 2015 р. № 124-VIII. URL: https://metinvestholding.com/Content/CmsFile/ua/assets_ZU-Pro-metrologiyu-ta-metrologichnu-diyalnist.pdf (дата звернення 20.02.2022).
8. Академічний тлумачний словник української мови: в 11 томах. – Том 1, 1970. – Стор. 13.
9. Сременко В. С., Мокійчук В. М., Рамазанова-Стьопкіна О. А., Редько О. О. Національні особливості калібрування. Український метрологічний журнал. 2017. №4. С. 12-18. URL: <https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/7767/1/%D0%A3%D0%9C%D0%96%204-2017.pdf> (дата звернення 20.02.2022).
10. EUROLAB. Selection, verification and validation of methods. *Springer*: web site. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-020-09473-7> (accessed: 20.02.2022).
11. ЗД-08.00.09 Політика НААУ щодо простежуваності вимірювання, що проводять органи з оцінки відповідності відповідно до заявленої сфери акредитації. Національне агентство з акредитації України. веб-сайт. URL: <https://naau.org.ua/polityka-naau-shhodo-prostezhuvanosti-vymiryuvannya-shho-provodyat-organy-z-otsinky-vidpovidnosti-vidpovidno-do-zayavlenoyi-sfery-akredytatsiyi/> (дата звернення 20.02.2022).
12. ILAC-P10:07/2020 ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results. *ILAC*: web site. URL: https://ilac.org/latest_ilac_news/revised-ilac-p10-published/ (accessed: 20.02.2022).
13. ILAC-P14:09/2020 ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration. *ILAC*: web site. URL: https://ilac.org/latest_ilac_news/revised-ilac-p14-published/ (accessed: 20.02.2022).
14. OZAK.Y-13. Інструкція по определению калибровочных и измерительных возможностей калибровочной лаборатории. 2021. 16 с. URL: <https://akkred.uz:8081/media/file/pdf/2021-03/0a1532ad-68d0-48f0-848b-8df6d1835de5.pdf> (дата звернення 20.02.2022).
15. ДСТУ OIML G 19:2018. Роль невизначеності вимірювання під час прийняття рішень про оцінку відповідності в законодавчо регульованій метрології (OIML G 19:2017, IDT). [Чинний від 2020-20-20]. вид. офіц. Київ, 2020. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81671 (дата звернення 20.02.2022).
16. ДСТУ EN ISO/IEC 17043:2017 (EN ISO/IEC 17043:2010; ISO/IEC 17043:2010, IDT) Оцінка відповідності. Загальні вимоги до перевірки професійного рівня. [Чинний від 2018-01-01]. вид. офіц. Київ, 2018. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72072 (дата звернення 20.02.2022).
17. The assessment of the trueness of a measurement procedure by use of a reference material. *EUROLAB* : web site. URL: https://dastmardi.ir/wp-content/uploads/2018/02/EUROLAB-Cook-Book-%E2%80%933-Doc-No-15-Assessment-of-the-trueness-of-a-measurement-procedure-by-the-use-of-a-reference-material_2017.pdf (accessed: 20.02.2022).

Received (Надійшла) 30.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.08.2022

Consideration of the requirements of en iso/iec 17025 regarding the calibration laboratory in the questions of the process a of the validation of procedures for the calibration of measuring equipment

Serhii Voitenko, Oleksandr Barvinskyi, Olga Babych, Viktor Mosharenkov

Abstract. During the military aggression of the Russian Federation, samples of foreign-made weapons and military equipment began to arrive in the Armed Forces of Ukraine. In the future, these samples will require technical maintenance, including metrological maintenance. As metrological service is handled by personnel who use them and undergo training, difficulties may arise with the metrological support of these samples. Some questions will be very acute. Preliminary TAIEX assessment missions of the European Commission have begun work in Ukraine as part of Ukraine's preparation for obtaining "industrial visa-free." One of the issues that is subject to assessment of metrological activity is the organization of the process of calibration of measuring equipment, starting with the accreditation of the calibration laboratory. The article considers a variant of the solution to one of the requirements of EN ISO/IEC 17025:2017, around which there is ambiguity in the understanding between experts and calibration laboratories, which is the validation of calibration methods for measuring equipment. The article provides justifications for the chosen approach and features of validation of calibration methods in comparison with test methods. A block diagram of the process of validation of the method of calibration of measuring equipment is proposed, as well as, within the framework of the process, the procedure for evaluating the characteristics: metrological traceability, range and uncertainty of measurement and processing of experimental data for the purpose of assessing the shift of the calibration method is considered. Reasons are given that the validation of the method of calibration of measuring equipment is carried out as part of the development (modification) of this method and these processes are interrelated. The use of this validation option developed (modified) by the calibration laboratory for the method of calibration of measuring equipment will give an opportunity regarding this issue: to implement the requirements of EN ISO/IEC 17025:2017 for the calibration laboratory; to provide a sufficient and adequate evidence base for the purposes of calibration; to make the validation process clearer, more transparent and less time-consuming. The article considers one of the variants of calibration method validation of measuring instruments by a calibration laboratory, justifications of the chosen approach are given. The procedure of evaluation of metrological traceability, measurement range and uncertainty, as well as processing of the experimental data obtained in order to evaluate the calibration method shift are considered. All this will further contribute to the formation of a common approach and understanding of these processes.

Keywords: validation, method, calibration, calibrations laboratory, evaluation, metrological traceability, the measurement range, the measurement uncertainty of the results.

А. І. Гапон, М. А. Денисенко, А. О. Зуєв, Н. О. Євсіна

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

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СУШІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОГО РЕГУЛЯТОРА

Анотація. Розглянуто процес сушіння деревини в якості основного капілярно-пористого матеріалу. **Метою** статті є розгляд метода оптимізації процесів сушіння капілярно-пористих матеріалів, у тому числі сушіння деревини та проведення моделювання температури у середині матеріалу за допомогою нейронного регулятора. Було визначено математичну модель об'єкта управління як камеру періодичної дії, яка є найбільш сприятлива для використання в лісоготівельних підприємствах та як ту, що має гарні економічні показники. Проведено аналіз існуючих технічних рішень за даною тематикою. Показані налаштування та процедура ідентифікації нейронного регулятора що використовується в даній задачі. Розглянуто моделювання оптимальної температури від 0 до 100 градусів Цельсія. За **результатами** дослідження показано, що наведений метод застосовується до різних класів керованих процесів.

Ключові слова: сушильна камера, капілярно-пористі матеріали, нейронний регулятор, система управління, математична модель, об'єкт управління.

Вступ

Деревина є важливою та цінною виробничою сировиною. У багатьох галузях промисловості або будівництва широко використовується деревина у вигляді пиломатеріалів, фанери, деревних плит та інших. Проте деревина відрізняється серйозним недоліком - підвищеною вологістю. Процес сушіння – видалення рідини із матеріалів тепловими способами. Здійснюється шляхом випаровування рідини і відведення утворених пар при підведенні до матеріалу теплоти [1], що висушується, найчастіше за допомогою так званих сушильних агентів. При сушінні змінюється теплопровідність матеріалу, знижується його об'ємна вага та підвищується міцність [2]. Це може бути забезпечено при відповідному режимі процесу сушіння, який повинен проводитись за певної температури, тиску та відносної вологості сушильного агента. Режим сушіння залежить від властивостей матеріалу, що висушується [3].

Огляд існуючих методів сушіння та сушильних камер

З різноманітності можливих методів сушіння впливає безліч конструкцій сушарок для тих чи інших методів. За технологічними ознаками сушарки можна класифікувати так:

- по тиску (атмосферні та вакуумні);
- за періодичністю процесу (періодичної, напів-безперервної та безперервної дії);
- за способом підведення тепла (конвективні контактні, радіаційні та сушарки з нагріванням матеріалу струмами високої частоти);
- за родом сушильного агента (повітряні, газові сушарки та сушарки на перегрітій або насиченій парі);
- за напрямом руху матеріалу та теплоносія (прямоточні, протиточні та перехресного струму);
- за тепловою схемою (калориферні, з додатковим внутрішнім обігрівом, з рециркуляцією частини відпрацьованого повітря, зі східчастим підігрівом та комбіновані, наприклад, зі східчастим підігрівом та рециркуляцією).

В статті [4] показано процес моделювання

температури саме в калориферних камерах, але там не використовується сушіння деревини, яка має особливості.

Найбільш прийнятними установками для сушіння капілярно-пористих матеріалів є пароповітряні сушильні камери періодичної дії. Ці установки, що застосовуються на підприємствах із невеликими обсягами деревини. При сушінні матеріалів у таких камерах можна виділити три основні етапи: прогрів або пропарювання матеріалу; етап постійної швидкості сушіння; етап з падаючою швидкістю сушіння. В [5] розроблено алгоритм оптимального управління процесом нагріву, але недоліком даного методу є те, що він не відповідає вимогам швидкодії.

Метою статті є оптимізація та моделювання процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів у сушильних камерах періодичної дії із залученням нейронного регулятора.

Об'єкт управління – сушильна камера періодичної дії

На підставі експериментальних досліджень перехідних характеристик камери окремо для каналів регулювання по «сухому» і «мокрому» термометрам і фізичних залежностей між окремими величинами, що характеризують процеси в камері, в [6] була запропонована структурна схема, що складається з восьми ланок (рис. 1).

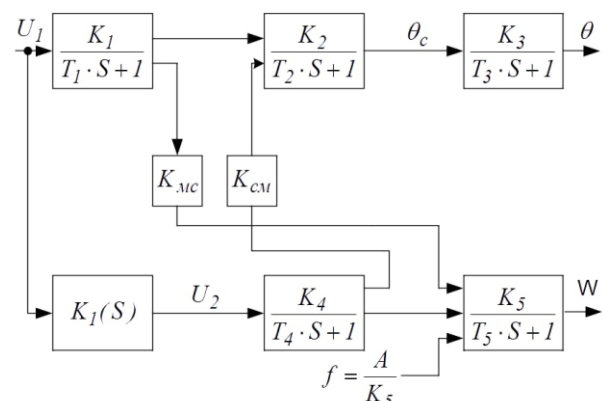


Рис. 1. Структурна схема об'єкта управління

При обмеженні положень засувок, величини U_1 та U_2 також обмежені. Ці обмеження є такими:

$$0 \leq U_1 \leq U_{1\text{макс}}, \quad 0 \leq U_2 \leq U_{2\text{макс}}. \quad (1)$$

Крім того, обмеження повинні бути накладені на швидкості зміни температури θ_c та вологості W матеріалу, оскільки надто високі градієнти цих параметрів можуть призвести до пошкодження матеріалу. Ці обмеження представлені у вигляді:

$$\left| \frac{d\theta}{dt} \right| \leq B_1, \quad \left| \frac{dW}{dt} \right| \leq B_2, \quad (2)$$

Тоді, передавальна функція може бути записана у такому вигляді:

$$K(s) = \frac{\theta(s)}{U_1(s)} = \frac{k_c(T_2s+1)(T_4s+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)(T_4s+1)(T_{21}s+1)}, \quad (3)$$

Звідси видно, що об'єкт управління має дві пари однакових нулів і полюсів, що призводить до складності у реалізації управління, зважаючи на неповну керуваність об'єкту.

Моделювання з використанням прогнозуючих моделей

Для того щоби усунути недолік розглянутий вище, що притаманний реалізації управління розрахунковим методом, доцільно провести моделювання з використанням прогнозуючих моделей у системі MATLAB/Simulink за допомогою блоку NN Predictive Controller, що дозволяє реалізувати таке управління з передбаченням.

При управлінні з передбаченням, модель керованого процесу використовується для того, щоб передбачити його майбутню поведінку, а алгоритм оптимізації застосовується для розрахунку такого управління, яке мінімізує різницю між бажаними та дійсними змінами виходу моделі. При керуванні з урахуванням еталонної моделі, регулятор – це нейронна мережа, яка попередньо навчена керувати процесом, для того щоб він відстежував поведінку еталонного процесу [7]. При цьому модель керованого процесу активно використовується для налаштування параметрів самого регулятора.

Модель регулятора з передбаченням реалізується за допомогою Neural Network Toolbox згідно за схемою, наведеною на рис. 2. Схема включає модель керованого процесу у вигляді нейронної мережі, яка

має бути навчена так, щоб мінімізувати похибку e між реакціями процесу y_p та моделі y_m на вхідний сигнал (або послідовність сигналів) u .

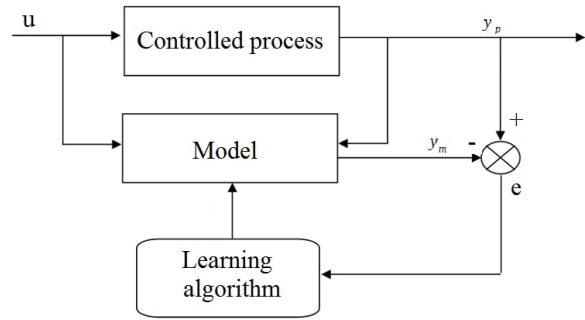


Рис. 2. Схема підсистеми ідентифікації керованого процесу

Об'єктом управління є сушильна камера, структурна схема якої після перетворень представлена на рис. 3.

Процес управління описується системою лінійних рівнянь п'ятого порядку, в кожне з яких входить лише одна фазова змінна, причому перші дві координати x_1 та x_2 змінюються згідно з [8], лише під впливом початкових умов.

Моделювання проводилось для процесу з наступними параметрами:

$$\begin{aligned} k_1 &= 130, & k_2 &= 0.61, & k_3 &= 1, & k_4 &= 40, \\ k_5 &= 2, & k_{mc} &= 0.8, & k_{cm} &= 0.75, \\ T_1 &= 1.12, & T_2 &= 1.17, & T_3 &= 2.33, & T_4 &= 0.33, \\ T_5 &= 0.83, & T_6 &= 1.84, & T_{21} &= 1.271. \end{aligned}$$

Після обчислення коефіцієнтів v_i за формулами:

$$\begin{aligned} v_1 &= v_2 = 0, \\ v_3 &= \frac{b_2}{(\lambda_3 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_5)}, & v_4 &= \frac{b_2}{(\lambda_4 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_5)}, \end{aligned} \quad (4)$$

складаємо систему диференціальних рівнянь та загальну схему об'єкта управління з використанням блоку NN Predictive Controller у Simulink, яка наведена на рис. 4.

Внутрішні дані блоку NN Predictive Controller (вікно Plant Identification) з параметрами об'єкту, для якого відбувається керування наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри симуляції для процедури ідентифікації

№	Назва параметру	Призначення	Величина
1	Size of Hidden Layer	розмір прихованого шару, визначається кількістю використовуваних нейронів	12 нейронів
2	Sampling Interval	такт дискретності в секундах, що визначає інтервал між двома послідовними моментами зйомки даних	0.001 с
3	No. Delayed Plant Inputs	кількість елементів запізнення на вході моделі	2
4	No. Delayed Plant Outputs	кількість елементів запізнення на виході моделі	5
6	Training Samples	довжина вибірки (кількість точок знімання інформації)	10000
7	Maximum Plan Input	максимальне значення вхідного сигналу	1
8	Minimum Plan Input	мінімальне значення вхідного сигналу	0
9	Maximum Interval Value	максимальний інтервал ідентифікації	0.1 с
10	Minimum Interval Value	мінімальний інтервал ідентифікації	0.01 с
11	Maximum Plan Output	максимальне значення вихідного сигналу	100
12	Minimum Plan Output	мінімальне значення вихідного сигналу	0

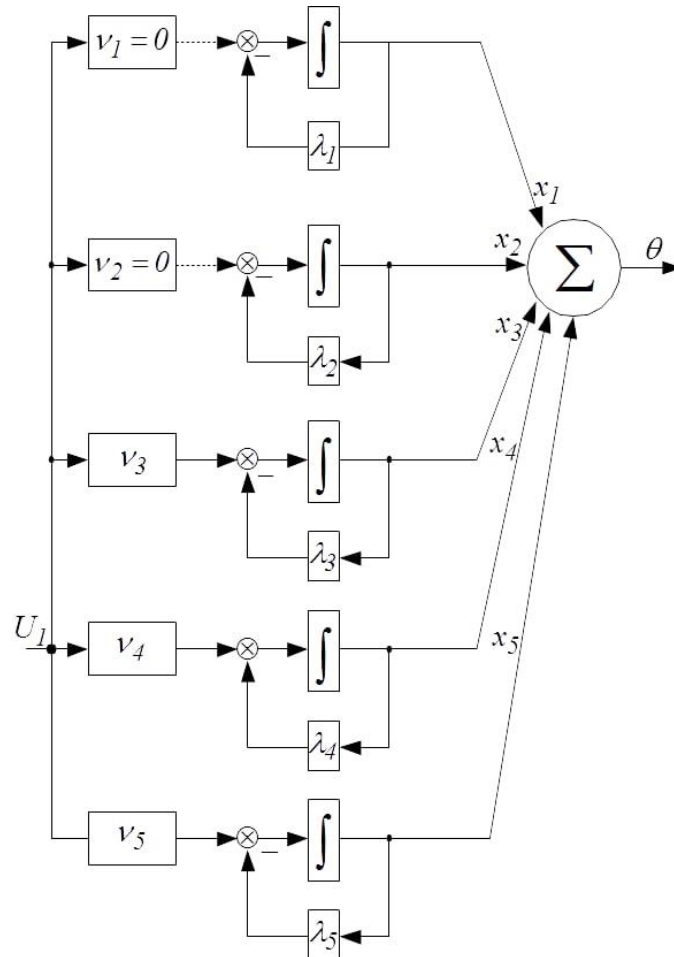


Рис. 3. Перетворена схема об'єкта управління

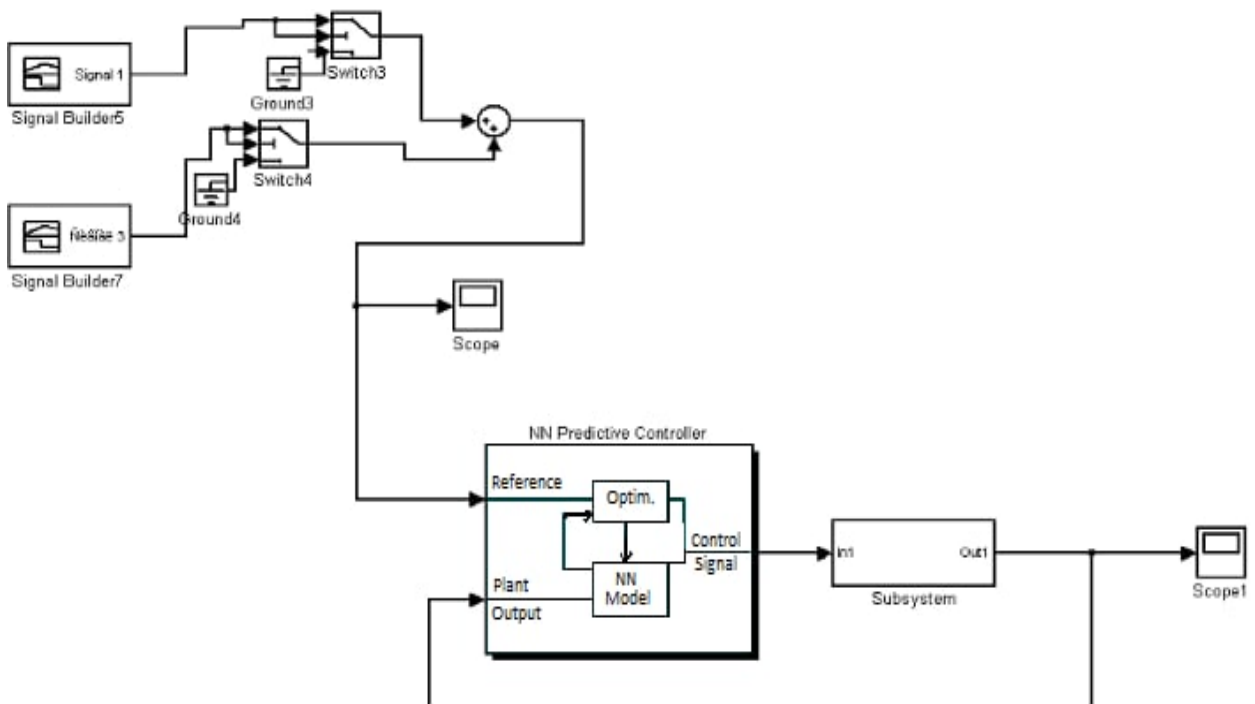


Рис. 4. Вигляд структурної схеми з прогнозуванням у Simulink

Параметри (табл. 2) є універсальним і можуть бути використані для побудови моделей будь-якого динамічного об'єкта, який описаний у Simulink.

Отримані результати моделювання температури від 0 °С до 100 °С усередині матеріалу наведені на рис. 5.

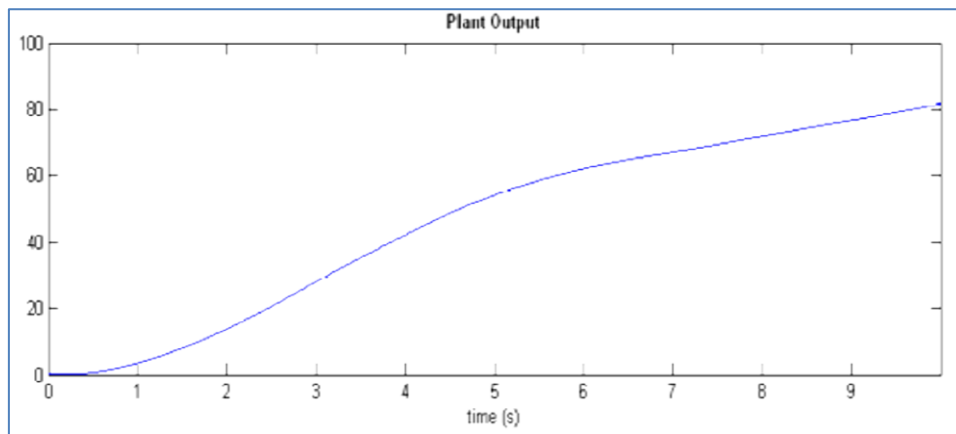


Рис. 5. Графік моделювання температури всередині матеріалу

Висновки

1. Визначення типу сушильної камери та обрання капілярно-пористого матеріалу є найбільш ефективним та практичним засобом, який реалізується на сьогоднішній день.

2. Проведений аналіз методів сушіння показав, що основною перевагою застосованого методу є те, що він застосовний до різних класів керованих процесів, а високі адаптивні властивості визначають його успішне використання у практиці побудови та експлуатації систем управління.

3. Проведено моделювання з застосуванням нейронного регулятора, яке довело плавне регулювання температури усередині матеріалу в заданому діапазоні. Відносним недоліком є те, що контролер, реалізує такий спосіб, вимагає значного обсягу обчислень, оскільки розрахунок оптимального закону управління оптимізація виконується кожному такті управління. Але слід сказати, що на практиці є контролери, які дозволяють вирішувати таке завдання.

Надалі передбачається застосування такого методу до моделювання більш складної системи управління.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ozarkiv, I. M., Kobrynovuch, M. S., Humeniuk, Z. H., & Petryshak, I. V. Контроль напружено-деформованого стану і вологості деревини в тепломасообмінних процесах сушіння. //Науковий вісник НЛТУ України. 2018.-№28(10), с. 81-84. DOI: 10.15421/40281017
2. Kudra T. Advanced drying technologies / T. Kudra, A.S. Mujumdar. - New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002. - 472 p. ISBN: 0-8247-9618-7.
3. Білей П.В., Кулешник Я.Ф., Соколовський І.А. Принципи побудови режимів сушіння деревини. //Науковий вісник НЛТУ України. - 2001, №11.2, с. 57-59.
4. Golisz E., Jaros M., Glowacki S. Modelling of biomass temperature in the drying process. E3S Web Conf. 2020, 154-1004. DOI: 10.1051/e3sconf/202015401004
5. Воронов В.Г., Качанов П.А., Рогачёв А.И. Разработка алгоритма оптимального управления процессом нагрева при сушке капиллярно-пористых материалов // Труды Всесоюзной конференции «Актуальные направления развития сушки древесины». – Архангельск: ЦНИИМОД, 1980. – с. 232-239.
6. Качанов П.А., Рогачёв А.И. К вопросу реализации оптимального управления процессами сушки капиллярно-пористых материалов. // Вестник «ХПИ», 1981. - №179. – с. 44-46.
7. Elsisli M. Design of neural network predictive controller based on imperialist competitive algorithm for automatic voltage regulator //Neural Computing and Applications 2019 31(4):1-11. DOI:10.1007/s00521-018-03995-9
8. Рогачёв А.И., Денисенко Н.А. Энергосберегающее управление процессом пропарки при сушке капиллярно-пористых материалов //Вісник НТУ «ХПИ», збірник наукових праць. Тематич. випуск Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПИ». 2007. - №36. - с.9-15

Received (Надійшла) 23.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.08.2022

Simulation of a drying system using a neural controller

Anatoly Gapon, Mykola Denysenko, Andrey Zuev, Natalia Yevsina

Abstract. The process of wood drying as the main capillary-porous material is considered. The research **purpose** is to consider the method of optimizing the drying processes of capillary-porous materials, including wood drying and modeling the temperature in the middle of the material using a neural controller. The mathematical model of the control object was defined as a batch camera, which is the most favorable for use in logging companies and as one that has good economic performance. An analysis was made of existing technical solutions on this topic. The settings and identification procedure of the neural controller used in this task are shown. Modeling of the optimal temperature from 0 to 100 degrees of Celsius is considered. According to the **results** of the study it is shown that this method is applied to different classes of controlled processes.

Keywords: drying chamber, capillary-porous materials, neural controller, control system, mathematical model, control object.

О. Г. Дрючко, О. В. Шефер, В. М. Галай, Б. Р. Боряк, Р. В. Захарченко, Д. П. Плешкань

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

МОДИФІКУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОКАТАЛІТИЧНО-АКТИВНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВУЗЛІВ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КООРДИНАЦІЙНИХ НІТРАТІВ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ

Анотація. Узагальнено важливі для практичного використання відомості про лужні координаційні нітрати рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи – прекурсори перспективних сучасних багатофункціональних матеріалів – щодо умов їх утворення й існування, природи хімічного зв'язку, складу, будови, форми координаційних поліедрів Ln, типу координації ліганд, існування ізогінних рядів по стехіометрії складу, структурі, виявляємим характерним властивостям. 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 композитних систем лантанодів і перехідних елементів широкого призначення, з каталітичною і фотокаталітичною активністю, покриття здатного самоочищатися з гідрофільними властивостями; розроблення різних комбінованих способів їх активації та встановлення технологічно-функціональних залежностей; керованого модифікування властивостей одержуваних цільових продуктів. Для підвищення фотокаталітичної активності зразків покриттів на основі вискодисперсного TiO₂ анатазанної модифікації запропонована методологія хімічного модифікування центрів окиснення у їхньому поверхневому шарі з термообробленням у контакті з продуктами термолізу розплавів лужних координаційних нітратів лантанодів. Виявлена ефективна тестова фотокаталітична деструкція парів органічних субстратів на прикладі етанолу. Доведена дієва активація роботи функціональних вузлів у складі самоналаштувальних комплексів очищення повітря з використанням нових фотокаталітично-активних трьох шарових перовскітоподібних оксидних матеріалів M₂Ln₂Ti₃O₁₀ (M – Li, Na, K; Ln – La, Nd). Варіативність таких способів створення і модифікування характеристик поліфункціональних покриттів визначається кількістю й індивідуальними властивостями представників природних рядів лантанодів, лужних металів періодичної системи, особливостями їх кооперативної поведінки у підготовчих технологічних стадіях, умовами і методами активації процесів формування, природою підкладки та іншими чинниками.

Ключові слова: лужні координаційні нітрати лантанодів, умови утворення, кристалічна будова сполук, характерні властивості, перетворення з фізичною активацією, модифікування характеристик композитних систем титанатів, адаптивні системи керування.

Вступ

Постановка задачі. Проведене авторами комплексне емпіричне дослідження спрямоване на розв'язання академічної проблеми з пошуку компромісів між якістю повітря у приміщеннях (об'єктах) перебування людей з наявними зонами деструктивного розкладання легких органічних речовин і енергоефективністю систем його забезпечення.

Для порівняльного аналізу за даними [1] на рис. 1 приведені графіки роботи двох типів систем забезпечення вентиляції приміщення з постійним повітрообміном за нормативними вимогами і адаптивної системи. Верхня різниця обмежуючих площ режимів роботи наочно демонструє зменшення витрати повітря і економію енергії в системі адаптивної вентиляції, яка може досягати 40-50%.

Аналіз літератури. Провідні міжнародні науково-дослідні центри та інститути, інноваційні дослідницькі та виробничі компанії постійно удосконалюють обладнання та ведуть дослідження в галузі створення нових високоєфективних методів і технологій фільтрації повітря в указаному напрямі. Створені модельні ряди систем очищення та знезараження повітря – промислового і спеціального призначення (в тому числі і медичного); каналні очищувачі, призначені для глибокого очищення повітря в системах припливної та витяжної вентиляції як окремих приміщень так і всієї будівлі; автономні очищувачі повітря, призначені для використання всередині приміщень у режимі рециркуляції та інші [2-5].

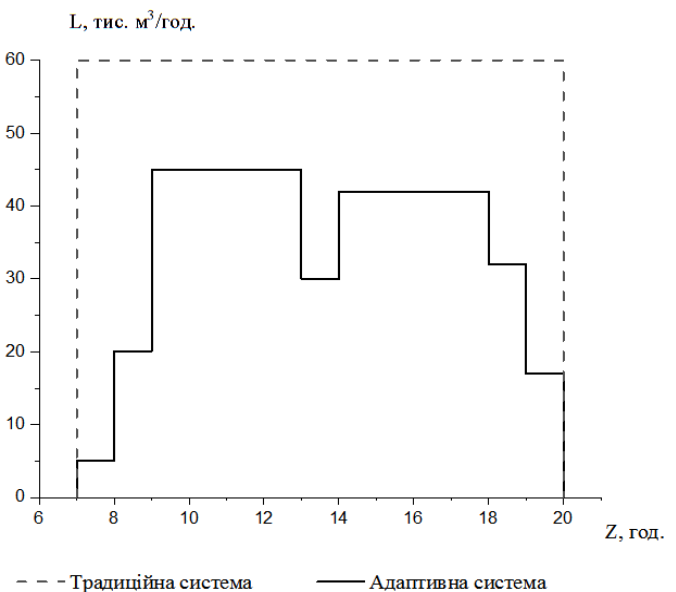


Рис. 1. Графіки роботи двох типів систем вентиляції приміщення з постійним повітрообміном за нормативними вимогами і адаптивної системи [1]

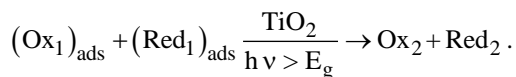
Застосовуються комплексні технології очищення та знезараження повітря, пов'язані між собою як фізично, а й фізико-хімічно, де кожен наступний ступінь фільтрації покращує якість та ефективність фільтрації попереднього ступеня, – з відповідними зонами грубого, тонкого та молекулярного очищення, обладнані: 1) передфільтрами, 2) блока-

ми зарядки аерозолів, 3) бар'єрними фільтрами тонкого очищення, 4) фотокаталітичними фільтрами, 5) комбінованими адсорбційно-каталітичними фільтрами, 6) УФ випромінювачами.

Продуктивність і енергоефективність таких самоналаштувальних систем визначаються показниками роботи кожного складового комплектуючого блоку і досконалістю застосованих проектних й управлінських рішень. У процесах очищення повітря від органічних домішок у сучасних розробках як фотокаталізатор використовують в основному TiO_2 [6].

Невирішені питання. Останнім часом діоксид титану привертає особливу увагу у зв'язку з новими унікальними перспективами його застосування у формі наноструктурованих матеріалів і нанокомпозитів з контрольованими морфологічними, фізико-хімічними та оптичними властивостями [7]. TiO_2 , який володіє високою хімічною і термічною стабільністю, а також домішковими рівнями в електронній структурі матеріалу, створюваними за рахунок заданого типу легування, є унікальним для побудови на його основі нових ефективних функціональних матеріалів, що застосовуються у фотокаталізі і фотовольтаїці, сенсоричі, каталізі, для рідинної хроматографії та інших сферах.

Суть фотокаталітичних властивостей TiO_2 полягає в тому, що в об'ємі напівпровідникової частинки під впливом електромагнітного випромінювання генеруються електрон – діркові пари, які при виході на поверхню частинки TiO_2 вступають в окислювально-відновні реакції з адсорбованими молекулами. Для діоксиду титану процес такий:



У цьому випадку частина електронів і дірок може здійснити рекомбінацію в масі або на поверхні TiO_2 . Для ефективного перебігу фотокаталітичних процесів необхідно, щоб окислювально-відновлювальні реакції за участю пари електрон-дірка були ефективнішими, ніж процеси рекомбінації.

Добре відомі переваги використання такого фотокаталітичного способу очищення:

1) можливість окислити практично будь-які органічні речовини і також ряд неорганічних, таких як CO , H_2S , HCN , NH_3 , NO_x та ін.;

2) метод працює при кімнатній температурі і атмосферному тиску;

3) можна окислювати навіть невеликі концентрації забруднювачів, очищення від яких іншими методами є економічно не вигідним;

4) для реалізації методу фотокаталітичного очищення не потрібні додаткові реагенти, тому що окислювачем є кисень повітря.

Однак для фотокаталітичного способу очищення повітря відомі і ряд недоліків, таких як:

1) порівняно невелика швидкість очищення;

2) необхідність використання джерел ультрафіолетового світла в разі, коли фотокаталізатором є діоксид титану;

3) низька адсорбційна здатність більшості простих фотокаталізаторів;

4) можливість утворення проміжних продуктів при окисленні великих концентрацій забруднювачів.

Тому розробка нових фотокаталітичних систем, які долали б зазначені недоліки, є предметом нагального ряду сучасних досліджень.

При створенні й тепловому обробленні матеріалів на основі діоксиду титану потрібно враховувати можливість виникнення поверхневих і об'ємних дефектів кристалічної решітки TiO_2 (в наслідок існування різноманіття фаз в інтервалі співвідношень $\text{O} / \text{Ti} < 2$ на фазовій діаграмі системи $\text{Ti} - \text{O}$ [8]) та виявлення їх значного впливу на фотохімічні властивості і фотоіндуковану гідрофільну здатність продуктів синтезу [9].

Наявні відомості щодо стану й можливих напрямів удосконалення технологій створення таких матеріалів, чинні вимоги до їх стабільності й відтворюваності властивостей, розширення сфер їх використання [2–9], прояв високої активності малозакристалізованими частками структурних компонентів, сформованими термолізом розчинника [10], нові відомості [11] щодо реакційної здатності й перетворення шаруватих перовскітоподібних оксидів, стабілізації фотокаталітично- і сенсорноактивної кристалічної модифікації анатаза за рахунок іонів NO_3^- , допірування Ln_2O_3 [12, 13], при одержанні TiO_2 із розчинів [14], тенденції впровадження досконалих електронних засобів (з малим часом експозиції, підвищеною точністю, надійністю) і мікропроцесорних систем управління – ініціювали продовження нашого дослідження за цією тематикою. Сьогодні з'ясовуються способи управління технічними параметрами цільових продуктів через вибір складу, умов синтезу та способу оброблення.

Одним із найбільш перспективних класів складних оксидних матеріалів рідкісноземельних елементів (РЗЕ) і титану є наноструктуровані шаруваті перовскітоподібні сполуки і тверді розчини на їхній основі. Залежно від складу і структури, вони мають широкий спектр фізико-хімічних властивостей. Представлені в даній роботі перовскітоподібні шаруваті титанати належать гомологічному ряду $(\text{Me}, \text{Ln})_{n+1}\text{Ti}_n\text{O}_{3n+1}$, де $\text{Ln} - \text{La-Nd}$, $\text{Me} - \text{Li-Cs}$, n – число наночарів перовскіта (фаз Руддлесден-Поппера; з товщиною одного шару приблизно 0,5 нм). Відповідно, MeLnTiO_4 у своїй структурі містить один наночар перовскіту, $\text{Me}_2\text{Ln}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$ – три. Перовскітоподібні наночаруваті титанати були одержані і досліджені авторами робіт [15–18]. Рис. 2 [19] демонструє морфологію частинок досліджуваних шаруватих титанатів.

Так оксиди $\text{K}_2\text{Nd}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$ (як приклад) кристалізуються в тетрагональній структурі. Просторова група для даних сполук визначена як $I4 / mmm$. Товщина шаруватих оксидів даного типу характеризується трьома титан-кисневими октаедрами $[\text{Nd}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}]$, що чергуються між собою і розділені катіонами лужних металів, в даному випадку катіонами калію, між шарами. Параметр решітки c ($\approx 30\text{Å}$) вказує на зміщення суміжних перовскітних шарів на $1/2$. Катіон неодиму знаходиться в центрі перовскітної решітки і характеризується 12-коор-

динованим кисневим оточенням. Катион лужного металу знаходиться у міжшаровому просторі і, як правило, 9-координований [18].

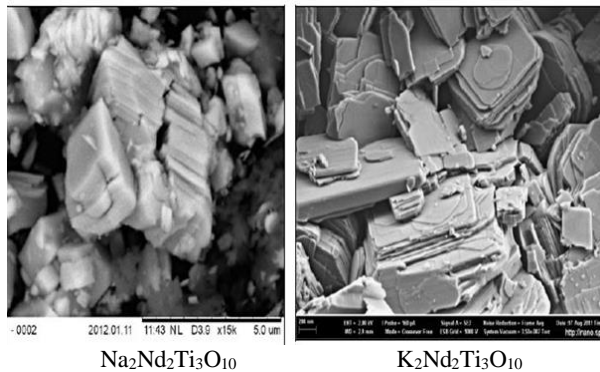


Рис. 2. Морфологія частинок досліджуваних шаруватих титанатів (Зображення SEM) [19]

Шарувата структура, що складається з пластичних частинок, зберігається продуктом при витриманні у вологому повітрі і підтверджена методом скануючої електронної мікроскопії [19]. Виявлена стабільність систем рекомендує їх як перспективні фотокаталізатори в умовах близьких до їх використання та є важливою для інших інноваційних сфер їх застосувань.

Аналіз публікацій останніх років засвідчує, що діоксид титану має основне застосування саме у тонко плівковому виді, у якому найефективніше реалізуються його властивості, необхідні для фотокаталізу, сонячної енергетики, сенсорики, самоочищення покриттів тощо.

Мета та завдання дослідження. Провести дослідження кооперативних процесів взаємодії між структурними компонентами у системах нітратних попередників представників РЗЕ церієвої підгрупи і елементів ІА підгрупи періодичної системи (Li, Na, K) в умовах аналогічних до регламентних при створенні багатфункціональних оксидних матеріалів різного призначення з використанням фотокаталітично активного TiO_2 з метою формування достовірних уявлень і одержання об'єктивних знань про особливості перетворень і сукупну поведінку складових елементів у підготовчих стадіях перероблення технологічних об'єктів з тепловою активацією (25-1000 °C), необхідних для удосконалення й розроблення методологій і регламентів сучасних технологій їх виготовлення.

Для досягнення поставленої мети у роботі поетапно вирішувалися такі завдання:

1) вивчення механізмів перетворень у системах координаційних нітратних прекурсорів РЗЕ і лужних металів у ході формування поліфункціональних фотокаталітично активних шаруватих оксидних матеріалів;

2) розроблення методології і виготовлення зразків фотокаталізаторів на основі TiO_2 анатазної модифікації і композицій зі структурою тришарового титанату $K_2Ln_2Ti_3O_{10}$ з їх двостадійним нанесенням і формуванням на структуровані металеві носії;

3) вивчення кінетичних закономірностей реакцій тестового фотокаталітичного окислення парів

органічних речовин (на прикладі етанолу) в статичному реакторі;

4) встановлення технологічно-функціональних залежностей; керованого модифікування властивостей одержуваних цільових продуктів.

Методологія експерименту

Для оцінки можливості керування процесами багатадійного формування складно-оксидних композицій з поліфункціональними властивостями й обґрунтування механізмів фазоутворення як модельні із використанням комплексу фізико-хімічних методів вивчені водно-сольові системи нітратів $MeNO_3 - Ln(NO_3)_3 - H_2O$, (Me – Li, Na, K; Ln – La-Sm) при 25-100 °C. Вибір складу об'єктів дослідження, температурні перерізи зумовлені рядом чинників.

По-перше, згідно роботам авторів [20 – 22] серед елементів рідкісноземельного ряду вищу комплексоутворюючу здатність виявляють представники церієвої підгрупи; серед них найбільші зміни складу, структури, властивостей їх сполук – елементи його середини, Pr і Nd. Вибрані компоненти систем задають технічні характеристики цільового продукту чи є модифікаторами його властивостей. А наявність великої кількості для використання потенціальних електронних аналогів (представників природних рядів рідкісноземельних, лужних елементів) зумовлює значну варіативність і широту діапазону модифікування їх характеристик. Температурні перерізи обумовлені областями існування кристалогідратних форм вихідних компонентів.

По-друге, за результатів досліджень авторів [23] трьох шарові калеві титанати $K_2Ln_2Ti_3O_{10}$ (Ln – La, Nd) вищевказаних складових елементів, одержані за керамічною технологією, у суспензійному вигляді у водно-спиртових розчинах під дією УФ випромінювання виявляють найвищу серед відомих видів шаруватих фаз фотокаталітичну активність по розкладанню H_2O і виділенню водню. Цей факт пов'язують з особливостями морфології їх частинок і здатністю оборотно інтеркалювати молекули води в міжшаровий простір, що може призводити як до збільшення ефективної питомої поверхні фотокаталізатора, так і сприяти просторовому розподілу центрів окиснення-відновлення.

Для з'ясування характеру хімічної взаємодії і фазових рівноваг у водно-солевих системах досліджуваних нітратів (прекурсорів багатокомпонентних оксидних поліфункціональних матеріалів) у повних концентраційних співвідношеннях в температурному діапазоні існування розчинів використаний метод добавок, описаний в [24, 25] і заснований на дослідженні розчинності як однієї з властивостей найбільш „чутливих“ до виявлення фазових перетворень у системах, що є одночасно параметром їхнього стану, і до того ж простими доступними нині експериментальними методами. Метод дозволяє знайти межі саморозвитку, до яких прямує у конкретних умовах в рівноважному стані ізольована система заданого складу.

Рівновага фаз досягалася протягом 2-3 діб. У якості вихідних солей використовували гідратовані і безводні нітрати вказаних елементів марки „ч.д.а.“.

Хімічний аналіз рідких і твердих фаз, „залишків” проводили на вміст Ln^{3+} й азоту. Вміст Ln^{3+} визначали трилометрично у присутності ксиленового помаранчевого у якості індикатора (ацетатний буферний розчин, $\text{pH}=5-6$) [26]; азоту – методом відгонки [27]; іонів Me^+ – розрахунком по різниці, виходячи із загального вмісту нітратів і частково по сухому залишку.

Одержані дані для окремих іонів перераховувались на сольовий вміст і згідно принципу відповідності наносились на діаграми розчинності. Графічне відображення складу твердих фаз, що утворюються у системі, проводили за Скрейнемакерсом [24, 25], підтвердження їх індивідуальності і охарактеризування – хімічним, кристалооптичним, рентгенофазовим, рентгеноструктурним, ІЧ-спектроскопічним, термографічним, іншими методами.

Кристалооптичні визначення сполук виконували імерсійним методом за допомогою мікроскопу МИН-8. Фазовий аналіз виконували на дифрактометрі ДРОН-3М ($\text{Cu K}\alpha$ – випромінювання, Ni – фільтр) за методом «порошка». Дифрактограми розшифровували за картотекою PDF JCPDS. Термогравіметричний аналіз проводили на дериватографі Q-1500 D при температурах від 293 K до 1273 K у повітряному середовищі зі швидкістю нагрівання 10 град. / хв. та розробленому пристрої для ДТА.

На етапі дослідження фотокаталітичного окислення парів органічних субстратів для формування зразків композиційних фотокаталізаторів був використаний Titanium Oxide Micro Powder (TiO_2 , Anatase, 1500 nm, 99,9 %) US Research Nanomaterials, Inc.

Для вивчення впливу сформованих зразків фотокаталізаторів на кінетику утворення газоподібних інтермедіатів проведено дослідження фотокаталітичного окислення парів органічних речовин (на прикладі етанолу) статичним методом у розробленій герметизованій камері-контейнері, обладнаній змінними навісним тримачем зразків досліджуваних об'єктів, внутрішнім випарним дозатором і зовнішнім реактором для малих і залпових доз-ін'єкцій субстратів, вентилятором – перемішувачем внутрішнього газового середовища, додатковим внутрішнім нагрівником, датчиком вимірювання концентрації CO_2 , навісними досліджуваними «пасивними» пластинами-адсорберами, системою освітлення.

Для вимірювання концентрації CO_2 в досліджуваному середовищі використаний портативний багатофункціональний електронний газоаналізатор AZ 7755 (AZ Instrument Corp., Тайвань), що дозволяє одночасне вимірювання температури, відносної вологоти та має можливість приєднання до зовнішнього інтерфейсу.

У роботі в якості освітлювачів використані: люмінесцентна лампа низького тиску потужністю 8 Вт і бактерицидна лампа тієї ж потужності з довжиною хвилі 254 нм.

Результати дослідження та їх обговорення

Механізми перетворень у системах координаційних нітратних прекурсорів РЗЕ і лужних

металів, що супроводжують формування поліфункціональних фотокаталітично активних шаруватих оксидних матеріалів. Узагальнені і важливі для практичного використання відомості про лужні координаційні нітрати рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи – прекурсорів перспективних сучасних багатофункціональних матеріалів – щодо умов їх утворення й існування, природи хімічного зв'язку, складу, будови, типу координації ліганд, існування ізотипних рядів по стехіометрії складу, структурі, виявляємим властивостям систематизовані авторами в [20, 21] й у найбільш наочній формі наведені в табл. 1–3 та рис. 3. Вибір такої форми представлення даних найбільш інформативний і корисний під час розроблення інноваційних проектів дозволяє прогнозувати причинно-наслідкові фундаментальні закономірності поведінки структурних компонентів в аналогічних виробничих процесах, правильно вибирати режими, стадійність, способи формування й одержання цільових продуктів з відтворюваними структуро-чутливими характеристиками.

Для з'ясування загальних закономірностей і побудови цілісної об'єктивної картини поведінки такого роду технологічних прекурсорів авторами проведено дослідження систем за природними рядами Y, La – Lu, Li – Cs. Аналіз результатів з комплексного вивчення приведено в попередніх роботах авторів [20 – 22, 28].

У потрійних РЗЕ-вмісних системах нітратних прекурсорів, які є невід'ємними компонентами більш складних багатокомпонентних систем, обмінні перетворення починаються з моменту розчинення складових у воді. З'ясовано, що Ln^{3+} церієвої підгрупи в досліджуваних умовах є активними комплексоутворювачами, утворюють аніонні координаційні сполуки з Me^+ усіх лужних металів, а їх стійкість і комплекс притаманних властивостей виявляються сильнодіючими технологічними факторами, що суттєво впливають на характер перетворень в системах як на проміжних стадіях, так і на результати процесів в цілому.

Одержані відомості дозволяють моделювати поведінку структурних компонентів на підготовчих стадіях формування сучасних поліфункціональних фотокаталітичноактивних матеріалів за інноваційними технологічними регламентами з використанням нітратних РЗЕ-вмісних прекурсорів.

Наявні виявлені тенденції фазоутворення в модельних досліджуваних системах є термодинамічно найбільш вірогідними межами перетворень в технологічних об'єктах в умовах формування й отримання цільових продуктів. А можливі реальні відхилення в подібних системах зумовлюються неоднорідністю реакційного середовища за складом, вмістом реагуючих компонентів, за умовами їх знаходження, скінченністю швидкості перетворень, дифузійними особливостями, теплоємністю, в'язкістю, природою перетворень на границях утворюваних гетеро фаз, використанням застосованих принципів і способів їх активації та іншими конкретними чинниками. А виявлені процеси комплексоутворення у водних

розчинах нітратів сприяють гомогенізації систем структурних компонентів на молекулярному рівні при комплексному чи комбінованому переробленні.

Аналіз одержаних даних вказує на протікання в системах у найближчому оточенні Ln^{3+} -комплексотворювача конкуруючих процесів заміщення молекул води на нітрат-іони. Ступінь повноти заміщення залежить від природи Ln^{3+} , присутніх Me^+ , властивостей електронно-донорних атомів кисню і просторової будови лігандів, концентрації аніонів, кількості температурного фактору. Спостерігаються відмінності у комплексотворюючій здатності елементів церієвої і ітрієвої підгруп, Y, а також серед РЗЕ у середині першої підгрупи. Одержані результати вказують на поетапність процесів комплексотворення. Наявність певних значень температури початку виділення у тверду фазу комплексних сполук – на існування енергетичного бар'єру і необхідності деякої енергії активації для здійснення таких перетворень. При утворенні нітратних комплексів у великій мірі виконуються вимоги симетрії і планарний малий розмірами ліганд NO_3^- є „зручним” для утворення високосиметричного оточення іона Ln^{3+} . Для лантанодів характерна схильність утворювати три типи координації NO_3^- -лігандів. Це веде до утворення, як ізольованих комплексів, так і їх полімеризацію у двоядерні, ланцюжки, каркаси.

Всі встановлені координаційні сполуки були синтезовані в монокристалічному вигляді і охарактеризовані комплексом фізико-хімічних методів. В табл. 2 і на рис. 3 приведені рентгено-дифракційні характерні параметри новоутворених фаз для можливості їх ідентифікації та виявлення в ході перероблення.

Авторами роботи проведено кристалохімічний аналіз сполук лужних рідкісноземельних нітратів, який базується на результатах власних досліджень [21, 29], так і на літературних даних [30]. Особливу увагу звернено на будову координаційних поліедрів Ln, яка багато в чому визначає основні властивості відповідних сполук. Аналізуючи форму, симетрію й інші властивості поліедрів (див. табл. 2), ми отримуємо можливість наблизитися до розуміння індивідуальних особливостей РЗЕ.

Дані про середні відстані Ln – O в рідкісноземельних нітратах лужних катіонів, обговорювані в роботі, добре узгоджуються з очікуваною тенденцією до зменшення відстаней Ln – O відповідно до лантанодного стиснення і до збільшення цих відстаней зі збільшенням координаційного числа для фіксованого іону РЗЕ. Відстані Ln – O (H_2O), як правило, відносяться до числа найбільш коротких контактів у поліедрах. Цей факт можна пояснити виходячи з наявності конкуруючих взаємодій зі зв'язками типу Ln – O (NO_3^-). Координаційні поліедри складені, як правило, атомами кисню бідентатно координуваних нітратогруп, рідше в поєднанні з атомами кисню молекул води. У всіх розглянутих сполуках координаційні числа представників лантанодів церієвої підгрупи 12.

При узагальненні структурних даних лужних координаційних нітратів РЗЕ звертає на себе увагу

надзвичайно обмежений асортимент координаційних поліедрів для таких високих КЧ РЗЕ.

Приведені нижче дані з термографічного вивчення літєвих, натрієвих, калієвих координаційних нітратів рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи (табл. 3) з'ясовують характер і закономірності теплових перетворень цих сполук в температурному діапазоні 25–1000 °С, встановлюють їхню термостійкість, інтервали існування, стадійність процесів, фазоутворення в залежності від складу, вмісту, природи складових компонентів, способу упаковки координаційних поліедрів у просторову побудову, умов і способу оброблення тощо. Це дає можливість прогнозувати поведінку застосованих потенціальних попередників в реальних технологічних системах в аналогічних умовах. Для порівняння й аналізу там же приводяться відомості про малі стабільність і термостійкість калієвих координаційних нітратів Y, Gd – Lu складу $\text{K}[\text{Ln}(\text{NO}_3)_4(\text{H}_2\text{O})_2]$, що обумовлює обмеження в застосуванні такого виду прекурсорів у технологічних перетвореннях з метою модифікування властивостей цільових продуктів.

За нашими даними Nd_2O_3 утворюється вище 515 °С.

Термічні перетворення виявлених у водно-сольовій системі калієвих координаційних сполук неодиму (представнику церієвої підгрупи) та ітербію (представнику ітрієвої підгрупи) прослідковані до 1000 °С і приведені в табл. 3. В ній також систематизовані і зведені значення температур виявлених ефектів, їх характер та природа перетворень. Одержані дані дозволяють проводити ідентифікацію фаз. Встановлена низка особливостей та закономірностей. Робиться їх обґрунтування з позицій конкуруючих процесів.

Виходячи із особливостей проведення технологічних процесів, одержання оксидних РЗЕ-вмісних функціональних матеріалів, становлять інтерес межі концентраційних співвідношень компонентів, яким відповідають на фазових діаграмах поля кристалізації вихідних нітратів РЗЕ, координаційних сполук, їх сумішей.

Результати досліджень термічних перетворень нових твердих фаз, виявлених у модельній системі, (рис. 3, табл. 3) свідчать про різний характер процесів перетворення сполук РЗЕ церієвої і ітрієвої підгруп, низько- і високотемпературних форм сполук „легких лантанодів”. Термограми сполук елементів першої підгрупи характеризуються утворенням безводних нітратів. Із сполук з однойменним зовнішньосферним катіоном термостійкіші нітрати з більшим вмістом лантаноду.

Встановлений факт наявності поліморфізму у кристалах сполук складу $\text{K}_2[\text{Ln}(\text{NO}_3)_5(\text{H}_2\text{O})_2]$ (Ln – La – Nd). Явище можна пояснити тим, що у кристалах виникає розупорядкування, зумовлене доступністю реалізації декількох відмінних орієнтацій іонів NO_3^- . Цей вид розупорядкування можливий в силу симетричності як самого плоского NO_3^- ліганду, способу координації їх центральним атомом (Ln^{3+} -комплексотворювачем), так і способу упаковки комплексів у просторову будову.

Таблиця 1 – Ізотермічні концентраційні межі кристалізації лужних координаційних нітратів неодиму із розчинів водно-солевих систем $\text{MeNO}_3 - \text{Nd}(\text{NO}_3)_3 - \text{H}_2\text{O}$ (Me – Li, Na, K)

Склад сполук	t, °C	Склади насичених розчинів, що відповідають перехідним і евтонічним точкам, мас. %		Характер розчинності
		MeNO_3	$\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$	
$\text{Li}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	65	19,32 13,95	59,61 65,63	інконгруентний
	100	24,03 9,68	54,68 72,51	конгруентний
$\text{Na}_2[\text{Nd}(\text{NO}_3)_5] \cdot \text{H}_2\text{O}$	50	16,55 8,60	51,62 62,58	інконгруентний
	65	20,44 3,03	50,40 70,17	інконгруентний
	100	25,27 4,15	47,28 76,96	інконгруентний
$\text{K}_2[\text{Nd}(\text{NO}_3)_5 (\text{H}_2\text{O})_2]$	50	27,26 21,34	51,62 54,91	інконгруентний
$\text{K}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot \text{H}_2\text{O}$	50	21,34 11,49	54,91 63,31	інконгруентний
	65	32,57 8,67	47,88 70,44	конгруентний
	100	40,15 3,39	45,02 76,44	конгруентний

Таблиця 2 – Рентгенографічні дані неодимових літєвих, натрієвих, калієвих координаційних нітратів

$\text{Li}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$				$\text{Na}_2[\text{Nd}(\text{NO}_3)_5] \cdot \text{H}_2\text{O}$		$\text{K}_2[\text{Nd}(\text{NO}_3)_5 (\text{H}_2\text{O})_2]$				$\text{K}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot \text{H}_2\text{O}$			
d, Å	I/I ₀ , %	d, Å	I/I ₀ , %	d, Å	I/I ₀ , %	d, Å	I/I ₀ , %	d, Å	I/I ₀ , %	d, Å	I/I ₀ , %	d, Å	I/I ₀ , %
8,36	30	2,013	19	7,84	63	5,42	66	2,056	24	9,48	85	2,281	21
7,64	77	1,979	19	7,54	47	5,27	90	1,993	27	7,74	92	2,249	69
6,68	13	1,944	28	7,07	73	4,94	45	1,947	26	7,65	32	2,189	54
6,00	38	1,931	26	5,18	27	4,11	72	1,777	11	5,36	39	2,108	68
5,75	79	1,855	15	4,23	100	3,88	15	–	–	5,27	40	2,082	37
5,42	98	1,778	15	3,80	57	3,80	42	–	–	4,94	30	2,058	15
5,26	74	1,726	28	3,15	23	3,66	12	–	–	4,76	46	2,012	49
4,76	51	1,708	34	3,09	67	3,53	42	–	–	4,49	87	1,909	21
4,64	100	–	–	3,02	86	3,35	38	–	–	4,26	27	1,837	27
4,35	43	–	–	2,629	20	3,18	13	–	–	4,06	100	1,757	19
4,19	47	–	–	2,391	17	3,05	73	–	–	3,89	40	1,729	16
3,94	51	–	–	2,346	17	2,873	17	–	–	3,78	22	1,714	18
3,90	40	–	–	2,307	8	2,843	33	–	–	3,73	39	–	–
3,56	26	–	–	2,234	13	2,783	14	–	–	3,36	19	–	–
3,32	19	–	–	2,178	27	2,750	17	–	–	3,27	26	–	–
3,22	47	–	–	1,979	13	2,724	40	–	–	3,18	55	–	–
2,978	34	–	–	–	–	2,664	14	–	–	3,07	16	–	–
2,772	19	–	–	–	–	2,639	19	–	–	3,04	17	–	–
2,617	28	–	–	–	–	2,594	100	–	–	2,844	20	–	–
2,545	43	–	–	–	–	2,463	37	–	–	2,755	12	–	–
2,385	21	–	–	–	–	2,392	19	–	–	2,730	18	–	–
2,328	17	–	–	–	–	2,374	44	–	–	2,647	55	–	–
2,305	23	–	–	–	–	2,314	15	–	–	2,592	16	–	–
2,226	19	–	–	–	–	2,235	25	–	–	2,508	87	–	–
2,135	49	–	–	–	–	2,188	10	–	–	2,468	78	–	–
2,111	43	–	–	–	–	2,099	21	–	–	2,349	32	–	–

Примітка: d, Å - міжплощинні відстані; I / I₀, % - відносна інтенсивність рефлексів.

Таблиця 3 – Значення температури виявлених ефектів під час термічної обробки представників встановлених груп лужних координаційних нітратів РЗЕ

Сполука; просторова група кристалів	Представники	Температурний інтервал формування, °С	Характер розчинності	Зневоднення	Плавлення у кристалізаційній воді	Поліморфні переходи	Плавлення безводної форми	Склад продуктів перетворення при 980°С
$\text{Li}_3[\text{Ln}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ кубіч.; $P2_13$	La – Sm	65-100	конгр.	65 183 216	183	–	274	LiLnO_2
$\text{Na}_2[\text{Ln}(\text{NO}_3)_5] \cdot \text{H}_2\text{O}$ монокл.; $P2_1/a$	La – Sm	50-100	конгр.	81 148 236	–	271	328	NaLnO_2
$\text{K}_2[\text{Ln}(\text{NO}_3)_5(\text{H}_2\text{O})_2]$ ромбіч.; $Fdd2$	La – Nd	50-100	інконгр.	95, 111	95	219	314	KLnO_2 , Ln_2O_3
$\text{K}_3[\text{Ln}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot \text{H}_2\text{O}$ кубіч.; $P4_332$	La – Sm	50	конгр.	126	–	–	347	Ln_2O_3
$\text{K}[\text{Ln}(\text{NO}_3)_4(\text{H}_2\text{O})_2]$ приміт. ромбіч.; $P2_1cn$	Y, Gd – Lu	50-100	конгр.	138, 172	138	–	–	Ln_2O_3

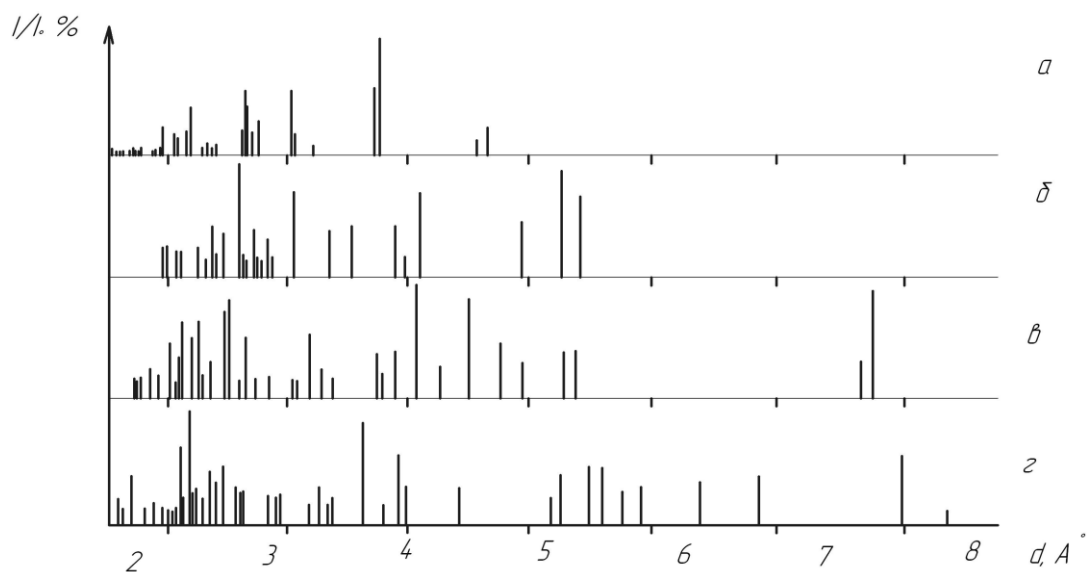


Рис. 3. Штрихрентгенограми вихідних солей нітратів

а – калію, б – $\text{K}_2[\text{Nd}(\text{NO}_3)_5(\text{H}_2\text{O})_2]$, в – $\text{K}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9] \cdot \text{H}_2\text{O}$, г – неодиму і виявлених координаційних сполук

Температурні властивості сполук ітрієвої підгрупи характеризуються відсутністю стійких безводних форм нітратів, низькими значеннями температур плавлення, дегідратацією із розплавленого стану, утворенням Ln_2O_3 (980 °С).

Склад продуктів термічного перетворення (порядку 980°С) сполук церієвої підгрупи залежить від складу вихідних нітратів, ступеню летючості оксидів відповідних лужних металів. У продуктах термолізу сполуки $\text{K}_2[\text{Ln}(\text{NO}_3)_5(\text{H}_2\text{O})_2]$, крім оксидів K_2O , містяться також їх діоксолантанодати KLnO_2 . Встановлено, що координаційні числа Ln^{3+} церієвої підгрупи – 12, виявлені у низькотемпературних асоційованих формах, зберігаються незмінними аж до утворення стійких високотемпературних багатокомпонентних оксидних фаз MeLnO_2 , $\text{Me}_2\text{Ln}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$. Це вказує на доцільність використання лужних координаційних нітратних РЗЕ-вмісних прекурсорів у подібних технологічних інноваційних рішеннях.

Модифікування поверхні дисперсії TiO_2 аналітичної модифікації у продуктах термолізу координаційних нітратів.

Аналіз результатів дослідження, із власного вивчення модельної системи і системний аналіз відомостей, отриманих із наукових публікацій за тематикою роботи, засвідчує про те, що позитивною особливістю використання вказаних РЗЕ-вмісних нітратних систем порівняно з іншими легкокорозійними системами хлоридів, оксалатів є те, що конкуруючі іоннообмінні взаємодії приводять до легкого утворення цілого класу аніонних координаційних сполук Ln^{3+} з атомами оксигену (донорами електронів) NO_3^- - груп (лігандів) усього природного ряду рідкісноземельних елементів, з усіма катіонами лужних металів, а ще до того ж стійких, як у розчинах, так і у розплавах. Це дозволяє здійснювати технологічні перетворення з низькими енергетичними затратами (внаслідок малого значення енергії активації процесів комплексоутворення Ln^{3+} з планарними малими за розміром NO_3^- групами). Комплексні сполуки легкоплавкі, малоагресивні, елементів церієвої підгрупи – нелеткі. Це дозволяє працювати при більш низьких температурах, розширюється температурний діапазон стійкості комплексних частинок.

Вплив сформованих зразків-фотокатализаторів (зі структурою тришарового титанату $Me_2Ln_2Ti_3O_{10}$ ($Me - K; Ln - Nd$) на кінетику окислення парів органічних речовин (на прикладі етанолу). Логічним практичним застосуванням й опробуванням одержаного комплексу емпіричних знань про сумісну поведінку і властивості складових компонентів в досліджуваних системах було розроблення одного із можливих способів нанесення і формування композиційних фотокаталітично активних покриттів на структуровані металеві носії (для мінімізації внеску адсорбційної складової у загальний ефект комплексного перетворення) із дисперсій субмікронних розмірів анатазної фази TiO_2 і подібних частинок з модифікованими властивостями їхнього поверхневого шару та послідуочого проведення їхнього порівняльного тестового випробування на активність у процесах фотодеструкції парів органічних речовин (на прикладі етанолу) у повітряному середовищі під впливом УФ опромінення. Модифікування активності центрів окислення об'єктів здійснювали двоох стадійним термообробленням зразків з роздільним етапуванням процесів: нанесенням і фіксуванням покриттів на основу із водно-суспензійних систем TiO_2 і розчинних нітратних прекурсорів Ln та лужних металів, взятих у заданих співвідношеннях; формуванням дифузійних потоків на міжфазних границях складових гетерогенних композиційних систем та регулюванням складу й умов перероблення розплавів нітратних прекурсорів (з метою створення сприятливих умов для асоціації титанатів з шаруватою структурою $Me_2Ln_2Ti_3O_{10}$). Такі композиційні системи являються кристалізаційно-конденсованими структурами твердіння.

(Вимоги до структурованих функціонально активних подібних покриттів, процедури їх підготовки та характеристики обговорюються в декількох оглядових статтях [31, 32]).

На підготовчих стадіях термооброблення вихідних водно-суспензійних систем із заправкою компонентного складу розчинних нітратних попередників у співвідношенні, що відповідає утворенню тришарового перовскітоподібного титанату $Me_2Nd_2Ti_3O_{10}$ ($Me_2O \cdot Nd_2O_3 \cdot 3TiO_2$, $Me - Li, Na, K; Ln - La - Nd$) відбувається видалення розчинника із пересиченого дисперсійного середовища, і згідно з вивченою політермічною діаграмою розчинності [21] (перетворення в області концентраційної конгруентності) поступове виділення зародків кристалів лужних координаційних нітратів Ln . Подальше нагрівання цих проміжних новоутворених фаз веде до їх плавлення і послідуочого розкладання з виділенням оксидів азоту і кисню. В [33] встановлено, що перехід субмікронного порошку діоксиду титану з анатаза в рутил відбувається при $750 - 850$ °C, а роль первинних елементів структури в таких дисперсних об'єктах грають частки порошку.

TiO_2 (анатаз) у досліджуваній багатоконпонентній гетерогенній системі веде себе хімічно індивідуально по відношенню до складових структурних компонентів до моменту зародження у продуктах термолізу розплаву нітратних координаційних прекурсорів слабо закристалізованих хімічно активних

частинок подвійних оксидів $MeLnO_2$ ($Me_2O \cdot Ln_2O_3$) [10]. При збільшенні енергії активації системи ($t > 520$ °C) і, відповідно, енергії теплового руху структурних елементів виникає можливість їх зближення на більш короткі відстані, проявляється зміцнення координаційного хімічного зв'язку між складовими катіонами відповідних металів і атомами кисневих аніонів з утворенням перовскітоподібних [34], в тій чи іншій мірі, катіоновпорядкованих тришарових оксидних структур $Me_2Ln_2Ti_3O_{10}$ з набором притаманних їм властивостей.

В роботі дослідження фотокаталітичної активності синтезованих матеріалів проводили на прикладі тестової реакції окислення парів етанолу в статичному реакторі. Процес відбувається з утворенням в газовій фазі проміжного продукту - ацетальдегіду, який в кінцевому рахунку повністю окислюється до CO_2 . Для сформованих композиційних фотокатализаторів спостерігалось збільшення швидкості окислення субстрату в порівнянні з чистим TiO_2 (рис. 4). В результаті це призводило до зменшення часу видалення субстрату і інтермедиату з газової фази та зниження максимальної концентрації ацетальдегіду в останній.

Тестове окислення субстратів парів органічних речовин (на прикладі етанолу) сформованими фотокатализаторами здійснювали при опромінуванні бактерицидною лампою (254 нм, 8 Вт) статичним методом в лабораторній камері $V_{камери} = 40$ дм³; при $T = 292$ К, відповідно: а) при введенні великої імітуючої дози C_2H_5OH 2 мл (дослід I) в присутності TiO_2 анатазної модифікації, нанесеного на структуровану неткану основу та б) малих доз 0,1 мл (дослід II), 0,2 мл (дослід III) C_2H_5OH з наступним випаровуванням, в присутності функціонально-активної композиції $K_2Nd_2Ti_3O_{10}$, нанесеної на сталеві листи і зволожені H_2O .

В досліді I покриття сформоване висушуванням нанесеної на структуровану неткану основу водної субмікронної дисперсії TiO_2 анатазної модифікації; в досліді II, III композиційні покриття зі структурою $K_2Nd_2Ti_3O_4$ сформовані на листових сталевих носіях за двоох стадійною процедурою нанесення і фіксування прекурсорів та наступним повільним нагріванням систем зі швидкістю 3-5 град. / хв. до 550 °C і витримкою протягом 4 год.)

Швидкість окислення субстрату залежала від способу виготовлення покриття (рис. 5), природи застосованих модифікаторів властивостей, послідовності стадій і режимів оброблення, сумісності покриття і матеріала основи та характеру його підготовки, застосованого компонентного складу і вмісту просочувальних систем, способу введення в реактор оброблюваних субстратів. Для можливості порівняння активності розроблених фотокатализаторів наважки маси TiO_2 у вихідних заправках водно-суспензійних систем зразків з чистим діоксидом титану і зразків з застосованими модифікованими композиціями брали однакові.

Катіоновпорядковані тришарові композиційні матеріали $K_2Nd_2Ti_3O_{10}$ за відповідних умов можуть виступати альтернативами TiO_2 анатазної модифікації, умовний питомий показник активності яких у 6,2 рази вищий у порівнянні з такою характеристикою діоксиду титану (рис. 4, табл. 4).

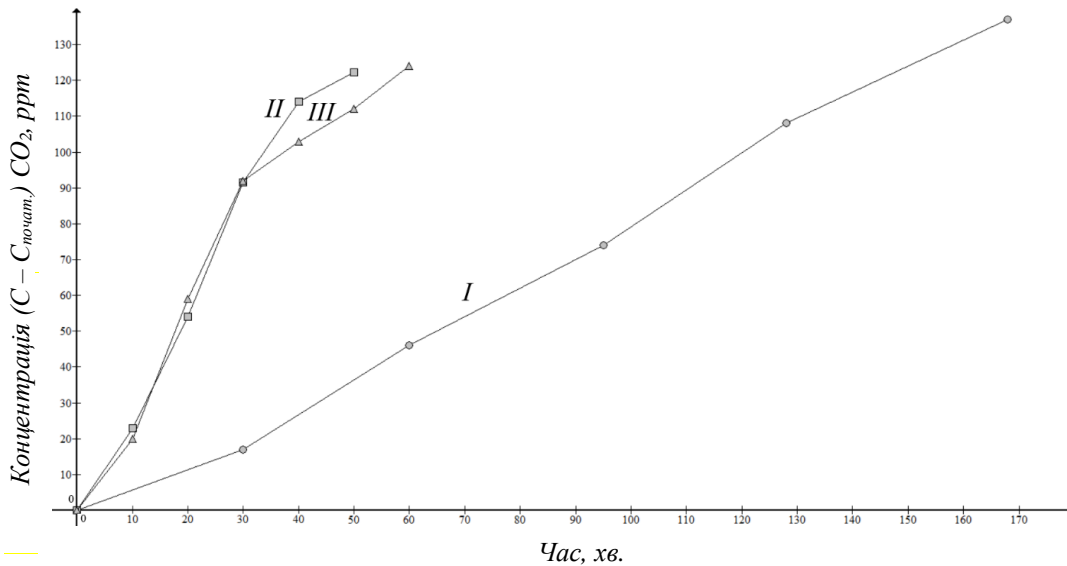


Рис. 4. Кінетика процесів окислення парів етанолу при ультрафіолетовому опроміненні фотокаталізаторів діоксиду титану (анатаз) (I) і композицій (II, III), модифікованих структурою шаруватих перовскітоподібних оксидів K₂Nd₂Ti₃O₄

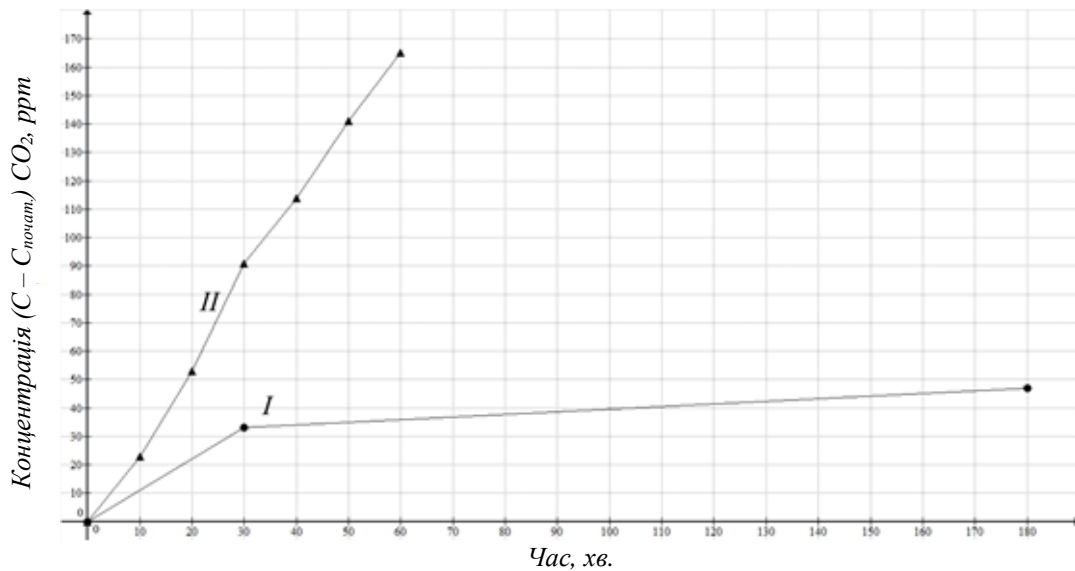


Рис. 5. Здатність зразків функціональних матеріалів розкласти органічні речовини (C₂H₅OH) під впливом опромінення бактерицидною лампою при різних способах оброблення їх фотокаталітично активного покриття: I зразок – K₂Nd₂Ti₃O₄ термічно сформований на сталевій основі S=218 см² при 370°C; II зразок – K₂Nd₂Ti₃O₄ (при 550°C); Поверхні злегка змочені H₂O; Однаковий спосіб введення дози – 0,1 мл 96% розчину етанолу випаровуванням

Таблиця 4 – Оцінювання умовної активності зразків фотокаталізаторів: I зразок – на основі TiO₂ (анатаз) і II зразок – на основі композиції тришарового оксиду K₂Nd₂Ti₃O₁₀ у процесах розкладання етанолу (рис. 4, для ділянок з пропорційними трендами)

Катіоновпорядкований тришаровий K ₂ Nd ₂ Ti ₃ O ₁₀	TiO ₂ (модифікація анатазу)
S=218 см ²	S=395 см ²
t = 18,8°C	t = 19,0°C
τ _Σ = 40 хв.	τ _Σ = 128 хв.
ΔCO ₂ = 114 ppm	ΔCO ₂ = 108 ppm
v _{сер.} = 2,85 ppm / хв.	v _{сер.} = 0,84 ppm / хв.
v _{сер. акт.} = 13,1 · 10 ⁻³ ppm/см ² · хв.	v _{сер. акт.} = 2,1 · 10 ⁻³ ppm / см ² · хв.

Одержані відомості дозволяють оптимізувати умови формування катіоновпорядкованих шаруватих титанатів; з'ясувати умови і виявити температурний діапазон застосування даного класу сполук. Отримані власні і літературні фізико-хімічні, термохімічні та структурні дані, а також результати їх

інтерпретації є етапом розвитку експериментальної і теоретичної наукової бази даних про шаруваті сполуки і процеси з їх участю.

Досліджуваний клас шаруватих сполук є перспективною основою для створення функціональних матеріалів з унікальними властивостями, які визна-

чаються двовимірним характером побудови міжшарового простору, спотворенням структури титанокисневих октаєдрів перовскітового шару і високою рухливістю катіонів лужних металів. Такі їх властивості можуть знайти своє застосування в інноваційних областях науки, техніки, енергетики, електроніки, екології (рис. 4, табл. 4).

Отримані авторами емпіричні дані з можливості запровадження активації способів очищення повітря на основі нових фотокаталітично активних шаруватих перовскітоподібних оксидних матеріалів $M_2Ln_2Ti_3O_{10}$ ($M - Li, Na, K; Ln - La, Nd$), створюваними методами «м'якої» хімії, результати власних попередніх напрацювань [див. 35] з моніторингу активності внеску CO_2 в повітряний простір реальних окремих приміщень складовими їх компонентами – людьми, адсорбуючими поверхнями споруд та інтер'єру, зонами з деструктивними процесами фотокаталітичного і термічного окислення легколетких органічних речовин, наявними рослинами, іншими стають необхідними передумовами для аудиту й розроблення адекватної моделі такого досліджуваного об'єкту управління, формулювання постановки технічного завдання на проектування й розроблення для нього адаптивної системи підтримання мікроклімату, програмного забезпечення з можливістю регулювання співвідношення припливно-рециркуційних повітряних потоків – адсорбційною і фотокаталітичною обробкою (як сонячним, так і штучним випромінюванням), тепловою дією комбінованих джерел енергії та з використанням композиційних TiO_2 -вмісних матеріалів, їх модифікацій; багатофункціональних комплексів з регенеруванням.

Одержані напрацювання відкривають напрями пошуку для створення сучасних систем виділення, очищення, регенерування, акумулювання, зберігання CO_2 , його часткового чи повного відновлення;

покращення їх технічних можливостей і характеристик з використанням інноваційних рішень. Можуть стати необхідним науковим фундаментом для інженерних узагальнень.

Висновки

1. Результати дослідження свідчать, що процеси одержання оксидних РЗЕ-вмісних функціональних матеріалів різного призначення із використанням нітратів елементів різної електронної структури хімічним змішуванням вихідних компонентів при спільному виділенні продуктів із рідкої фази послідовним чи сумісним осадженням з наступним термообробленням відбуваються стадійно, через утворення низки проміжних фаз. Дані про їхній склад, вміст і поведінку в кожному конкретному випадку потребують попередніх системних емпіричних знань в повних концентраційних співвідношеннях у заданому температурному інтервалі.

2. Виявлено відмінності в поведінці структурних компонентів у системах лантанодів церієвої й ітрієвої підгруп, в їхньому характері взаємодії, стадійності, особливостях і закономірностях перебігу.

3. Одержані нові дані становлять основу для:

– пошуку способів збільшення активності Ln-форм;

– з'ясування природи послідовних термічних перетворень у нітратних РЗЕ-вмісних багатокомпонентних системах різних агрегатних станів у ході їхнього термооброблення; умов утворення й існування, властивостей проміжних фаз; впливаючих факторів; можливих способів керування одержання цільового продукту;

– створення сучасних досконалих низькозатратних технологій формування функціональних фотокаталітично-активних матеріалів із відтворюваними властивостями.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A. L. Naumov, D. V. Kapko. CO_2 – Ventilation Systems' Efficiency Criterion. Inside air quality. Demand controlled ventilation. АВОК. – 2015. – № 1. – С. 12-22
2. Air Handling Units & Ventilation Systems. <https://www-daikin-eu.translate.google.com/en-us/architectsconsultants.html?>
3. Professional factory waste gas treatment equipment. <https://www.klean-esp.com/Uploads/202106/60c172fef34d5.jpg>
4. Разработка и производство вентиляционных установок. <https://ventmachine.ru/fko.html>
5. Фотокаталитические фильтры в современных кондиционерах и воздухоочистителях. <https://daikin.kh.ua/>
6. Панасюгин А. С., Павловский Н.Д. Очистка воздуха промышленных предприятий от органических загрязнителей с использованием фотокаталитического метода. Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 66-70.
7. Boxue Zhang, Shengxin Cao, Meiqi Du, Xiaozhou Ye and Jianfeng Ye. Titanium Dioxide (TiO_2) Mesocrystals: Synthesis, Growth Mechanisms and Photocatalytic Properties. *Review. Catalysts*. 2019. Vol. 9. P. 91-118. URL: <https://doi.org/10.3390/catal9010091>.
8. Murray, J., Wriedt H. The O–Ti (oxygen-titanium) system. *Journal of Phase Equilibria*. 1987. Vol. 8 (2). P. 148-165.
9. Fujishima, A., Zhang X., Tryck D.A. TiO_2 photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*. 2008. Vol. 63(12). P. 515-582
10. Кудренко Е.О. Структура прекурсоров сложных оксидов РЗЭ, полученных методом термолитиза растворителя / Е.О. Кудренко, И.М. Шмытько, Г.К. Струкова // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – Вып. 5. – С. 924–930.
11. Родионов, И. А. Фотокаталитическая активность слоистых перовскитоподобных оксидов в практически значимых химических реакциях / И. А. Родионов, И. А. Зверева // Усп. хим. – 2016. – Т. 85, № 3. – С. 248–279.
12. Lagaly, G. Interaction of alkylamines with different types of layered compounds. *Solid State Ionics*. 1986. Vol. 22, No. 1, P. 43-51.
13. Masato Machida, Kaori Miyazaki, Shigenori Matsushima and Masao Arai. Photocatalytic properties of layered perovskite tantalates, $M_2LnTa_2O_7$ ($M = Cs, Rb, Na, and H; Ln = La, Pr, Nd, and Sm$). *J. Mater. Chem*. 2003. Vol.13. P. 1433-1437
14. Gopalakrishnan, J. Transformations of Ruddlesden-Popper oxides to new layered perovskite oxides by metathesis reactions / J. Gopalakrishnan, T. Sivakumar, K. Ramesha et al. // Chem. Phys. – 2000. – Vol. 9. – P. 6237-6241.
15. Schaak, R. E. $KLnTiO_4$ ($Ln=La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy$): A New Series of Ruddlesden–Popper Phases Synthesized by Ion-Exchange of $HLnTiO_4$ / R.E. Schaak, T.E. Mallouk // J. Solid State Chem. – 2001. – Vol. 161(2). – P. 225–232.

16. Zhu, W. J. Synthesis and characterization of layered titanium oxides NaRTiO_4 ($R = \text{La, Nd and Gd}$) / W.J. Zhu, H.H. Feng, P.H. Hor // *Mater. Res.* – 1996. – Bull. 31(1). – P.107–111.
17. Richard, M. Synthesis, characterization, and acid exchange of the layered perovskites $\text{A}_2\text{Nd}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$ ($A = \text{Na, K}$). / M. Richard, L. Brohan, M. Tournoux // *J. Solid State Chem.* – 1993. – Vol. 112. – P. 345–354.
18. Gopalakrishnan, J. $\text{A}_2\text{Ln}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$ ($A = \text{potassium or rubidium; Ln = lanthanum or rare earth}$): a new series of layered perovskites exhibiting ion exchange / J. Gopalakrishnan, V. Bhat, // *Inorg. Chem.* – 1987. – Vol. 26(26). – P. 4299–4301.
19. Utkina, T., Chislov M., Silyukov O., Zvereva I. TG and DSC investigation of water intercalation and protonation processes in perovskite-like layered structure of titanate $\text{K}_2\text{Nd}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$. *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016. Vol. 125. P. 281–287.
20. Дрючко О.Г., Стороженко Д.О., Бунякіна Н.В. Фізико-хімічне охарактеризування координаційних нітратів РЗЕ і лужних металів – прекурсорів оксидних поліфункціональних матеріалів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2018. № 39 (1315). С. 3–13. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2018.39.01>.
21. Dryuchko, O. Features of transformations in REE-containing systems of nitrate precursors in preparatory processes of formation of multifunctional oxide materials / O. Dryuchko, D. Storozhenko, A. Vigdorichik, N. Bunyakina, I. Ivanytska et al. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2019. – Vol. 72(1). – P. 199–214. <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1542066>
22. Дрючко О.Г. Особливості перетворень в РЗЕ-вмісних системах нітратних прекурсорів у підготовчих процесах формування перовскітоподібних оксидних матеріалів / О.Г. Дрючко, Д.О. Стороженко, Н.В. Бунякіна, Б.О. Коробко, І.О. Іваницька, А.М. Пашенко // *Вісник національного технічного університету «ХПІ», серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 22(1194). – С. 63–71.
23. Rodionov I.A. Photocatalytic properties and hydration of perovskite-type layered titanates $\text{A}_2\text{Ln}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$ ($A = \text{Li, Na, K; Ln = La, Nd}$) / I. A. Rodionov, O. I. Silyukov, T. D. Utkina, M. V. Chislov, Yu. P. Sokolova & I. A. Zvereva // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2012. – Vol. 82(7). – P. 1191–1196.
24. Аносов В.Я., Озерова М.И., Филалков Ю.Я. Основы физико-химического анализа. М.: Наука, 1976. 503 с.
25. Горощенко Я. Г. Физико-химический анализ гомогенных и гетерогенных систем. К.: Наукова думка, 1978. 490 с.
26. Бусев А.И., Типцова В.Г., Иванов В.М. Руководство по аналитической химии редких элементов. М.: Химия, 1978. 432 с.
27. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Количественный анализ. – М.: Химия, 1976, кн. 2. – 480 с.
28. Storozhenko D.O. Phase Formation in REE-Containing Water-Salt Systems at the Preparatory Stages of the Multicomponent Oxide Functional Materials Formation / D.O. Storozhenko, O.G. Dryuchko, N.V. Bunyakina, I.O. Ivanytska // *Innovations in Corrosion and Materials Science*. – 2015. – Vol. 5. – No. 2. – P. 80–84.
29. Vigdorichik A.G., Malinovskiy Yu.A., Dryuchko A.G. Low-temperature X-ray structure analysis of potassium-neodymium nitrates $\text{K}_3[\text{Nd}_2(\text{NO}_3)_9]$ and $\text{K}_2[\text{Nd}(\text{NO}_3)_5(\text{H}_2\text{O})_2]$. *Crystallography*. 1992. Vol. 37. Iss. 4. P. 882–888.
30. Eriksson B. Crystal and molecular structure of potassium diaquapentanitrolanthanate (III) / B. Eriksson, L.O. Larrson, L. Niinisto et al. // *Acta Chem. Scand.* – 1980. – A 34. – No. 8. – P. 567–572.
31. Meille, V. Review on methods to deposit catalysts on structured surfaces. *Appl. Catal.* 2006. Vol. 315. P. 1–17.
32. Avila, P. Monolithic reactors for environmental applications: A review on preparation technologies / P. Avila, M. Montes, E.E. Miró // *Chem. Eng. J.* – 2005. – Vol. 109. – P. 11–36.
33. Cromer D.T., Herrington K. The structures of anatase and rutile. *J. Amer. Chem. Society*. 1955. Vol. 77. № 18. P. 4708–4709.
34. Schaak R.E. Perovskites by Design:– A Toolbox of Solid-State Reactions / R.E. Schaak, T.E. Mallouk // *Chemistry of Materials*. – 2002. – Vol. 14. – No. 4, – P. 1455–1471.
35. Storozhenko D., Dryuchko O., Golik Yu., Kytaihora K. Monitoring activity of the CO_2 emission objects system components in formation of the air mass in individual closed premises. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2019. No. 2(53). P. 157–170. <https://doi.org/10.26906/znп.2019.53.1907>.

Received (Надійшла) 11.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

Modification of characteristics of photocatalytic active functional units of adaptive air cleaning systems using coordination nitrates rare-earth elements and alkali metals

O. Dryuchko, O. Schefer, V. Galai, B. Boriak, R. Zakharchenko, D. Pleshkan

Abstract. Information on alkaline coordination nitrates of rare-earth elements of the cerium subgroup - precursors of promising modern multifunctional materials - on the conditions of their formation and existence, the nature of the chemical bond, the composition, structure, shape of the Ln coordination polyhedra, the type of ligand coordination, and the existence of isotopic series in stoichiometry are generalized. composition, structure, characteristic properties. The data obtained (as primary information) is the basis for the detection, identification, and control of the phase state of processing objects in the preparatory stages, the choice of criteria for the compatibility of the components in the formation of single-layer and layered nanostructured oxide composite systems of lanthanides and transition elements for general purposes, with catalytic and photocatalytic activity, coatings self-cleaning with hydrophilic properties; development of various combined methods for their activation and identification of technological functional dependencies; controlled modification of the properties of the obtained target products. To increase the photocatalytic activity of coating samples based on highly dispersed anatase TiO_2 , a methodology for chemical modification of oxidation centers in their surface layer with heat treatment in contact with thermolysis products of alkaline coordination lanthanide nitrate melts is proposed. An effective test photocatalytic destruction of organic substrates vapors has been discovered using ethanol as an example. Effective activation of the functioning of functional units in the composition of self-adjusting air purification complexes using new photocatalytically active three-layer perovskite-like oxide materials $\text{M}_2\text{Ln}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$ ($M = \text{Li, Na, K; Ln = La, Nd}$) has been proven. The variability of such methods for creating and modifying the characteristics of polyfunctional coatings is determined by the number and individual properties of representatives of the natural series of lanthanides, alkali metals of the periodic system, the peculiarities of their cooperative behavior in the preparatory technological stages, conditions and methods of activation of formation processes, the nature of the substrate, and other factors.

Keywords: alkaline coordination lanthanide nitrates, formation conditions, crystal structure of compounds, characteristic properties, transformations with physical activation, modification of characteristics of titanate composite systems, adaptive control systems.

A. Kapiton¹, R. Baranenko², D. Tyshchenko³, T. Franchuk³

¹ National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

² Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

³ Kyiv National University of Trade and Economics, Kiev, Ukraine

IMPLEMENTATION OF COMPLEX SOLUTIONS IN THE PROCESS OF USING CAT SYSTEMS

Abstract. The article analyzes the state of the problem of system development and implementation CAT systems. The purpose of the article is to analyze the possibilities of modern information technologies used in the professional activities of future specialists, in particular translators, to investigate the features of the corresponding software. The work examines information processes, types of information, methods of information transmission; software tools for the effective use of computer information technologies, the possibilities of the main resources of the global network are considered.

Keywords: CAT systems, information systems, information technologies, software.

Introduction

The rapid growth of the amount of information in all spheres of human activity requires the formation of new abilities, skills and qualities in future specialists to meet their professional needs for information and the use of information technologies during professional activities. In order to ensure translation activity at a high professional level, future translation specialists must possess modern information technologies, the emphasis of using which shifts to the area of collective work on the performance of complex translation tasks.

The strengthening of the growth of the processes of European and world integration into the educational space indicates the need to find new, more advanced approaches and technologies for the professional training of translators, which would ensure the achievement of high results, which leads to the need for increased attention to various aspects of their professional training. The development of the higher education system of Ukraine is conditioned by the processes that take place in European areas and actualize the need for human preparation for life in the conditions of the information society.

Harmonious entry of the state into the world community based on the principles of equal cooperation and information openness is impossible without the introduction of information technologies in the educational sector. The need for radical transformations is not driven by individual information technologies, but by the need to spread scientific knowledge, which becomes the most important component of the cultural, socio-economic and ecological development of society and the formation of its moral and spiritual values.

Analysis of recent research and publications. A number of publications are devoted to the issue of analysis of the development and implementation of CAT systems. O. Panchenko, L. Lopko, G. Khodorenko investigate the main tasks of CAT systems, as well as their advantages and disadvantages [1]. In particular, it is about the analysis of the problem of choice and efficiency of software use. Thus, E. Dolynsky and K. Skyba believe that special software allows to automate the relevant processes in translation activities

and improve the quality of the result [2, 9]. The place of software as one of the determining factors in quality professional activity is noted by A. Hafiak [8]. The main task of future specialists, according to K. Skyba, is the ability to use the Internet as a global database and source of information; use Internet resources in future professional activities; use electronic dictionaries; translate texts using machine translation systems; use translation memory programs [9].

The presented results of the specialists' research allow us to affirm the relevance of the task of researching the corresponding software. We believe that there is a problem of studying and applying CAT systems in the information space, in particular during the modern development of the informatization of translation activities.

Main part

Given the intensive development of the information society, the main thing place in the list of competencies that a modern translator should have, takes informational competence. A high level of its formation will allow future translators to use information technologies for the effective solution of professional tasks that take on new forms.

Complex solutions in this aspect are the application of systems automated translation. CAT programs (Computer Assisted Translation) use translation memory technology in their work. This technique is particularly useful when you need to translate uniform, similar texts, such as legal documents, technical instructions, statistical or economic translation, etc. You can save a third of the time compared to the traditional translation method. The implementation of new directions is based on the application of these systems activities of translators, in particular, localization of software products and web sites directly related to internationalization processes and globalization. This requires mastering modern forms, methods, and tools for carrying out professional activities [3, 4, 5].

In the context of implementation of translation projects, special attention CAT systems deserve. They combine a complex of technologies and tools to ensure:

documentation translation, management terminological bases, creation of translation memory bases, control of terms performing translations and checking their quality, creating translation documents projects and the distribution of roles of translators during their implementation, etc.

The more texts you translate with the help of CAT programs, the richer their memory becomes, which means that the work is more efficient and faster. After all, with each additional task, more and more new sentences and phrases and their translations are stored in the memory of the program. And they will be encountered more and more often in further texts, especially if you have to deal with one topic.

But the main advantage of such programs is to ensure constant translation accuracy. Especially when it comes to monotonous texts with complex topics. If you need to translate an article in a scientific journal, and use other words for the same phenomena, but using CAT programs will help you avoid them. Today, there are many such programs. The most popular are Trados, Wordfast, memoQ, Transit. Most of them are commercial products. The use of such systems is effective, first of all, during translation agrarian, technical, financial, legal and other documentation, characteristic for which there is a saturation of industry terminology, and which has a high degree repetition of texts [5-7].

A modern translator cannot compete in the market of translation services without mastering translation information technologies. Computer Aided Translation includes the following basic computer technologies: installation of general linguistic and specialized dictionaries on a computer (offline); automated translation systems; translation memory systems; online (network) specialized and explanatory dictionaries; Internet search.

Systems of automated (machine) translation can be used for fast translation from different languages, large volumes of text on special topics taking into account their specificity, after editing, such translation approaches the quality of manual translation. Translation memory systems significantly increase translation productivity without sacrificing quality. During team work on the project, such systems allow to use the collective experience of translators and ensure unity of terminology, which significantly increases the quality of translation.

As a basis for the study of the software component of information technologies under the SDL software product is assigned to the implementation of translation projects Trados. The task of which is creation, filling and use of terminological bases using SDL MultiTerm software module; creation of memory bases of translations on based on previously translated texts using the SDL Trados module WinAlign; formation of translation projects and implementation of translation texts with the connection of terminological databases, translation memory databases, and a dictionary AutoSuggest using the SDL Trados Studio module.

The results of the conducted research indicate a high level of formation of the information competence of future specialists. The modern development of the information society determines the place of informational competence in the list of competences that a modern translator should possess, as one of the defining ones. This will allow future translators to use information technology for the effective solution of professional tasks that take on new forms. It is confirmed by the current state of distribution of the translation services market, with of which 68% is technical translation, 20% is localization, 7% is oral translation, 5% – translation of audio and video materials, looks as shown in Fig. 1.

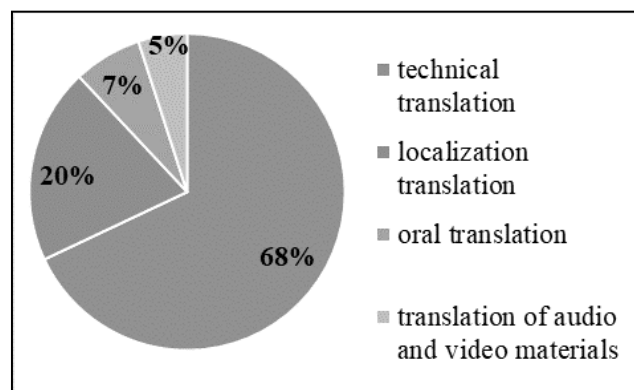


Fig. 1. State of distribution of the market of translation services

An additional way to get rid of errors in translated texts and save more time is to use translation quality control programs - QA-programs (QA-quality assurance). Their application is the next stage after working with professional translation programs, when the text has already been compiled into a bilingual (bilingual) file. QA programs analyze it for the presence of the most common errors based on formal features. Let's figure out what errors we are talking about.

The program checks the correct placement of punctuation marks, non-compliance with the case of the first word, spelling errors, etc.

If the source text contains numbers and abbreviations that are not in the translated text, this will not go unnoticed.

QA programs get rid of the "space problem": they detect them at the end of a paragraph, before punctuation marks, and also find double spaces.

That is, they analyze and mark as "suspicious" those inconspicuous errors that the human eye may simply not pay attention to. Quality control programs can do even more. If the meaning of a term does not match the official interpretation, or if the translated text turns out to be too short or long compared to the original, be sure that the program will notify you. Specialized quality checking programs, such as Xbench, Verifika, Error Spy, provide more efficient analysis of texts and help to detect errors more thoroughly. But, armed with software algorithms, the most correct translations will be created automatically. After all, the translator must check and control each stage of software processing of texts.

The programs we talked about cannot do all the work instead of a translator. In addition, the result of the program does not guarantee the correct translation. If all the formal signs of a correct text are observed, then the program algorithm can accept a random set of words as "truth". CAT and QA programs were not created to replace professional translators.

They are their assistants, and are intended only to simplify and speed up the translation. It is the translator who gives the finished look to the translated text, deciding which prompt of the program to use and which to discard.

Everyone benefits from the use of automated translation software and its quality control.

Customers will be able to save money, translators will fulfill more orders, and readers will receive a quality text. And the more texts you translate in such

programs, the more efficiently they will make subsequent translations. So, you will save even more time and fulfill even more orders. Using automated translation and quality control programs gives you a powerful competitive advantage.

Conclusions

Information technologies in translation activities intended for mastering modern information technologies used under time of translation activity. The main focus of the research is aimed at studying specialized software, in particular, automated translation systems that can solve a wide range of tasks, typical for the process of translation in the conditions of technological processes. The article analyzes the main issues of the problem, defines the tasks and offers ways to solve them using modern software.

The practical result of the work is a study of the implementation of information systems through the use of software products, which helped not only to reduce resource costs, but also to solve a number of other tasks. It is to ensure the quality of translation activities that future translation specialists must have skills in working with modern software. The continuous development of the information society determines the need for the formation of information competence. It is she who occupies the main place in the list of competencies that a modern specialist should possess. A high level of its formation will allow young specialists to use CAT systems for effective solution of professional tasks.

REFERENCES

1. Панченко О., Лопко Л., Ходоренко Г. Сучасні інформаційні технології у сучасній діяльності перекладача. Пороги, 2010. 168 с.
2. Долинський Є., Скиба К. Інформаційні технології у професійній діяльності перекладача : навчальний посібник з інформаційних технологій для студентів. ХНУ, 2016. 75 с.
3. The five best free translation programs [Electronic resource] - Access mode: https://it-s.at.ua/publ/programni_zasobi_p_jat_krashhikh_bezkoshtovnikh_program_dlja_perekladu/2-1-0-27
4. Extension for translation in the browser. TOP-8 services for Google Chrome [Electronic resource] - Access mode: <https://web-promo.ua/ua/blog/rasshireniya-dlya-perevoda-v-brauzere-top-8-servisov-dlya-google-chrome/>
5. Translator program: pros and cons [Electronic resource] - Access mode: <https://taskforce.ua/uk/programa-perekladach-plyusy-i-minusy/>
6. Pros and cons of popular online translators [Electronic resource] - Access mode: <https://taskforce.ua/uk/programa-perekladach-plyusy-i-minusy/>
7. Modern professional translation: a look behind the scenes [Electronic resource] - Access mode: <https://thewordpoint.com.ua/blog/modern-professional-translation>
8. 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.
9. Skyba K. M. Teaching translation with a help of a translation memory program Актуальні проблеми перекладознавства та методики навчання перекладу, 2011. 77-78.

Received (Надійшла) 03.07.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

Впровадження комплексних рішень в процесі використання CAT систем

А. Капітон, Р. Бараненко, Д. Тищенко, Т. Франчук

Анотація. У статті проаналізовано проблему системної розробки та впровадження CAT систем. Метою статті є аналіз можливості сучасних інформаційних технологій, що використовуються у професійній діяльності майбутніх спеціалістів, зокрема перекладачів. Досліджено особливості відповідного програмного забезпечення. У роботі розглядаються інформаційні процеси, види інформації, способи передачі інформації; програмні засоби ефективного використання комп'ютерних інформаційних технологій, розглянуто можливості основних ресурсів глобальної мережі.

Ключові слова: CAT системи, інформаційні системи, інформаційні технології, програмне забезпечення.

Л. І. Леві

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГІДРАВЛІЧНОГО РЕГУЛЯТОРА РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД

Анотація. Проблема керування вологозабезпеченням сільськогосподарських культур у цілому світі є надзвичайно важливою. Перетворення сільськогосподарського виробництва у високорозвинутий сектор економіки неможливе без зменшення його залежності від несприятливих природо- кліматичних умов шляхом ведення зрошувального землеробства у зонах недостатнього та нестійкого зволоження. Зрошувальне землеробство є важливою складовою виробництва продукції рослинництва, стабілізуючим фактором продовольчого та ресурсного забезпечення держави, особливо в роки з несприятливими погодними умовами. В залежності від кліматичних умов, рельєфу, глибини залягання ґрунтових вод застосовують різні види зрошення: краплинне, дощування, полив по смугам і борознам, підґрундове. На територіях з надмірним зволоженням для зменшення вологості ґрунту до необхідного для сільськогосподарських культур рівня застосовують осушувальні системи. На територіях з глибиною залягання ґрунтових вод до 1,5 ... 2 м та рівнинним рельєфом широко застосовують підґрундове зволоження. Прикладами є західна та центральна частини України. Осушені землі в Україні становлять 3.2 млн. га, майже 70% з них мають закритий дренаж, на 1,1 млн. га застосовується двостороннє регулювання водного режиму. На даний час технічний стан внутрішньогосподарських осушувальних систем потребує покращення шляхом модернізації та докорінної реконструкції. Крім того, через незадовільний технічний стан меліоративної мережі в посушливі роки не на всій площі використовуються за призначенням системи двобічної дії. Існує потреба відновлення ефективного функціонування наявних меліоративних систем на осушуваних землях, що не повною мірою забезпечується шляхом використання ручного режиму регулювання вологості ґрунту. Існуючі засоби водорегулювання потребують вдосконалення у напрямку покращення точності регулювання рівнів води, врахування впливу випадкових зовнішніх збурень, забезпечення ресурсозберігаючих режимів зрошення сільськогосподарських рослин в умовах дефіциту водних та енергетичних ресурсів, що створить умови для ефективного ведення землеробства.

Ключові слова: гідравлічний регулятор двосторонньої дії, регулюючий колодязь, електромагнітний клапан, колектор, дренажний стік, мікропроцесорний регулятор.

Вступ

Постановка проблеми. Як відомо, максимальна врожайність сільськогосподарських культур досягається при оптимальній кількості вологи, живлення, тепла, повітря і світла. При цьому необхідний для сільськогосподарських культур водний режим ґрунту створюється відповідним режимом зрошення, який встановлює норми, терміни і кількості поливів в залежності від біологічних особливостей культур, природних і господарських умов. При визначенні витрат води на зрошення враховують водоспоживання, або сумарне випаровування, що залежить від кліматичних умов, кількості теплової енергії, яка надходить на поверхню, вологості ґрунту, виду та врожайності культури.

Комплексне вирішення цих проблем можливе лише за допомогою розробки сучасних технічних засобів автоматизації та методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур. Таким чином, розробка методів автоматизованого керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з врахування збурень є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні осушувально-зволожувальні системи (ОЗС) потребують комплексного підходу до автоматизації, тому існує потреба у забезпеченні автоматичними засобами всього ланцюга водорегулювання від головної водозабірної споруди до споруд на відкритій і закритій мережі. А використання однотипних уніфікованих пристроїв, значно покращить експлуата-

ційні показники, знизить витрати та підвищить ефективність регулювання водно-повітряного режиму ґрунту у цілому.

У роботах [1 – 3] запропоноване використання гідрорегуляторів закритої мережі для регулювання рівня води у відкритих каналах

Всі гідрорегулятори мають засоби налаштування, які дають змогу легко змінювати уставки регульованих рівнів за допомогою зміни положення поплавків, що дає змогу здійснювати оперативне регулювання рівня ґрунтових вод (РГВ), а також задавати регульовані рівні у відкритих каналах. Встановлення гідрорегуляторів у регульовальні колодязі здійснюється за допомогою кронштейнів або розтяжок і не потребує їх переобладнання, а монтаж у коробчасті затвори шлюзів-регуляторів технологічно нескладний і може бути виконаний у експлуатаційній установі [1 – 3].

Слід зазначити, що застосування гідравлічної автоматизації на ОЗС дозволяє підвищити якість будівництва і технічний рівень експлуатації меліоративних систем.

Конструктивно гідрорегулятори мають невелику кількість елементів, що поліпшує їх надійність, а також при їх виготовленні використовується мінімальна кількість металевих деталей. Крім того, всі вони обладнані однаковими уніфікованими запірними органами, що дає можливість зменшити затрати на їх виготовлення та експлуатацію. У міжвегетаційний період або при потребі очистки гідротехнічних споруд гідрорегулятори демонтуються і зберігаються у складських приміщеннях [1 – 3].

Враховуючи, що ОЗС з підґрунтовым зволоженням є дуже інерційними, а перехідний процес у них може тривати декілька діб, вище названі фактори не дозволяють забезпечити потрібну точність та оперативність керування. Крім того, крім опадів, існують і інші метеорологічні збурення, які впливають на вологість ґрунту, наприклад, температура та вологість повітря. Для підвищення точності та оперативності керування необхідно вдосконалити конструкцію існуючих гідрорегуляторів, забезпечивши зміну уставки РГВ не тільки у ручному, а й в автоматичному та дистанційному режимах; розробити структуру автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, де б усі її елементи були з'єднані у єдину інформаційну систему; забезпечити автоматичний розрахунок завдання РГВ, враховуючи різноманітні метеорологічні збурення та їх прогноз; розробити інтерфейс взаємодії оператора із системою керування.

Таким чином, актуальною проблемою є розробка нових методів керування вологозабезпеченістю, які здатні забезпечити необхідну точність та оперативність керування на всіх фазах розвитку сільськогосподарських культур з врахуванням дії змінних збурень з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів.

Формулювання мети статті. Метою статті є розробка методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на ОЗС з підґрунтовым зволоженням для підвищення ефективності функціонування цих систем та забезпечення отримання гарантованих врожаїв сільськогосподарських культур з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети планується вирішити задачу удосконалення структури гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії за допомогою мікропроцесорного модуля.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на ОЗС з підґрунтовым зволоженням.

Предметом дослідження є методи та системи автоматизованого керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням діючих збурень.

Основна частина

Як було показано у попередньому розділі, існуючі гідрорегулятори мають ряд недоліків, тому нами запропоновано удосконалену конструкцію гідравлічного регулятора двосторонньої дії, наведену на рис. 1, де:

- 1 – регулюючий колодязь;
- 2 – колектор;
- 3 – запірний орган;
- 4 – давач рівня води;
- 5 – труба;
- 6, 7 – електромагнітні клапани;
- 8 – фільтр;
- 9, 10 – еластичні клиновидні камери;

- 11, 12 – електромагнітні клапани;
- 13, 14 – ежектори;
- 15, 16 – електромагнітні клапани;
- 17 – електромагнітний клапан для зв'язку з атмосферою;
- 18 – мікропроцесорний регулятор;
- 19 – давач кількості опадів;
- 20 – давач температури повітря;
- 21 – давач вологості повітря;
- 22 – давач швидкості вітру.

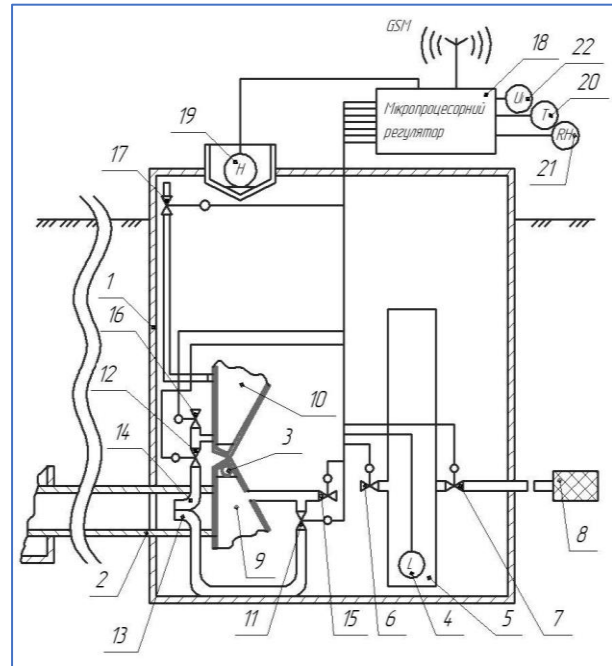


Рис. 1. Удосконалена конструкція гідравлічного регулятора двосторонньої дії

В залежності від виду вирощуваних на керованому меліоративному модулі сільськогосподарських культур, схеми зволоження, часу вегетації та погодних умов гідравлічний регулятор може працювати в різних режимах [4 – 6].

Регулювання рівня ґрунтових вод (РГВ) на модулі може здійснюватися або шляхом затримки дренажного стоку в початковій періоді вегетації чи в післядощовій періоді, або шляхом подачі води на зволоження з каналу через колектор 2.

Мікропроцесорний регулятор 18 підтримує заданий РГВ шляхом керування станом запірного органу 3.

В режимі затримки дренажного стоку мікропроцесорний регулятор відкриває електромагнітний клапан (ЕК) ЕК7 і закриває ЕК6. Якщо рівень в трубі 5 за показами датчика 4 нижчий заданого, то мікропроцесорний регулятор закриває ЕК11 та ЕК12 і відкриває ЕК15. ЕК16 і ЕК17. При цьому вода з колодязя через ЕК15 і ЕК16 надходить в камери 9 і 10, внаслідок чого запірний орган перекриває отвір колектора і проходить затримка дренажного стоку. Якщо рівень в трубі 5 вищий заданого, то мікропроцесорний регулятор закриває ЕК15 і ЕК16 та відкриває ЕК11, ЕК12, ЕК17. Вода через ЕК11 і ЕК12 починає зливатись з камер 9 і 10. При витіканні води

з камери 10 виникає різниця зовнішнього тиску води в колодязі та внутрішнього в камері 10, що створює зусилля, яке починає відкривати запірний орган. При проходженні води з колодязя через колектор 2 в трубках 13 і 14 виникає ефект ежекції, що прискорює злив води з камер 9 і 10, зменшуючи інерційність відкриття запірного органу.

Через заданий час, який визначається об'ємом камери 10, мікропроцесорний регулятор закриває ЕК17 і в обох камерах за рахунок ежекції підтримується розрідження, що забезпечує надійне відкриття запірного органу в цьому режимі.

При роботі регулятора в режимі водоподачі від каналу мікропроцесорний регулятор закриває ЕК7, відкриває ЕК6, забезпечуючи регулювання рівня в колодязі за показами датчика рівня 4.

В процесі регулювання рівня, якщо його значення нижче заданого, то мікропроцесорний регулятор відкриває ЕК15, ЕК16, ЕК17 та закриває ЕК11 і

ЕК12. При цьому запірний орган відкритий. Якщо рівень в колодязі вище заданого, то мікропроцесорний регулятор відкриває ЕК11, ЕК17 та закриває ЕК12, ЕК15, ЕК16, закриваючи тим самим запірний орган.

Висновки

Удосконалено структуру гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії. Для цього до складу гідравлічного регулятора введено:

додаткові електромагнітні клапани;
давачі рівня води, кількості опадів, температури та відносної вологості повітря, швидкості вітру;
мікропроцесорний блок керування, обладнаний безпроводним інтерфейсом зв'язку.

Це дозволило підвищити швидкодію роботи та опрацювання інформації, точність керування вологістю кореневого шару ґрунту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Матус С.К. Удосконалення водорегулювання на автоматизованих осушувально-зволожувальних системах з урахуванням рельєфної диференціації території: дис. канд. техн. наук: 06.01.02 / С.К. Матус – Рівне, 2013. – 208 с.
2. Наумчук О.М. Удосконалення процесів водорегулювання на осушувально-зволожувальних системах засобами гідравлічної автоматизації: дис. канд. техн. наук: 06.01.02 / О.М. Наумчук – Рівне, 2007. – 218 с.
3. Пастушенко В.Й. Автоматизована система керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Автоматизовані системи управління та прилади автоматизації. – Харків, ХНУРЕ, 2009. – Випуск 147. – С. 46 – 52.
4. Пастушенко В.Й. Автоматизовані системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового та крапельного зрошенні та їх технічна реалізація // В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // XVI Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2009». Тези доповідей. – Чернівці, 22 – 25 вересня 2009. – С. 202 – 204.
5. Пастушенко В.Й. Програмне та технічне забезпечення автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на меліоративних системах двосторонньої дії. / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // XVII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2010». Тези доповідей. Том 1. – Харків, 27 – 29 вересня 2010. – С. 264 – 267.
6. Пастушенко В.Й. Автоматизація процесу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового зволоженні на меліоративних системах двосторонньої дії / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2011». Матеріали конференції. – 28 – 30 вересня 2011 року, Львів. – С. 107 – 108.

Received (Надійшла) 10.07.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

Technical implementation of the hydraulic regulator groundwater level

L. Lievi

Abstract. The problem of moisture management of crops around the world is extremely important. The transformation of agricultural production into a highly developed sector of the economy is impossible without reducing its dependence on adverse climatic conditions by conducting irrigated agriculture in areas of insufficient and unstable moisture. Irrigated agriculture is an important component of crop production, a stabilizing factor in food and resource security of the state, especially in years with adverse weather conditions. Depending on climatic conditions, relief, depth of groundwater, different types of irrigation are used: drip irrigation, sprinkling, irrigation in strips and furrows, subsoil. In areas with excessive moisture, drainage systems are used to reduce soil moisture to the level required for crops. In areas with a depth of groundwater up to 1.5 ... 2 m and flat terrain, groundwater moisture is widely used. Examples are the western and central parts of Ukraine. Drained lands in Ukraine make up 3.2 million hectares, almost 70% of them have closed drainage, and 1.1 million hectares have bilateral water regulation. At present, the technical condition of in-house drainage systems needs to be improved through modernization and radical reconstruction. In addition, due to the unsatisfactory technical condition of the reclamation network in dry years, not the entire area is used for the purpose of the bilateral system. There is a need to restore the effective functioning of existing reclamation systems on drained lands, which is not fully provided by using a manual mode of soil moisture regulation. Existing water regulation tools need to be improved in order to improve the accuracy of water level regulation, take into account the impact of accidental external disturbances, provide resource-saving irrigation regimes for agricultural plants in conditions of shortage of water and energy resources, which will create conditions for efficient agriculture.

Keywords: hydraulic double-acting regulator, regulating well, solenoid valve, collector, drainage drain, microprocessor regulator.

О. А. Мураховська, Н. А. Українець

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

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК НА ЕТАПІ ПОПЕРЕДНЬОГО ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

Анотація. Актуальність. На сьогоднішній день актуальною є розробка програмного комплексу САКОПР 2.0 з розширеними функціональними можливостями та покращеним інтерфейсом. **Методи дослідження.** Математичний апарат теорії нечітких множин, багатокритеріального аналізу варіантів, розпізнавання образів та експертних систем. **Мета статті:** проаналізувати існуючі методи та підходи до знаходження вагових коефіцієнтів експертів та побудови узагальненого ранжування альтернатив в умовах неспівпадаючих оцінок експертів. Також необхідно розробити методику, що дозволяє надалі розширити та доповнити функціональні можливості програмного комплексу САКОПР. **Отримані результати.** Проаналізовано основні властивості статистичних оцінок, що відображають узгодженість експертних оцінок, а також показники, що дозволяють оцінювати множинну узгодженість думок щодо одного чи більше об'єктів експертизи. Описано застосування методів статистичної обробки експертних оцінок при груповому узгодженні у разі різноспрямованих показників, що включає аналіз узгодженості оцінок експертів, побудова узагальненого ранжування та обчислення вагових коефіцієнтів експертів. Розроблено методику та показано можливість використання цієї методики на етапі попереднього проектування складних технічних систем з різним принципом дії ступенів. **Висновок.** Розроблений у роботі підхід може бути використаний на етапі концептуального проектування складних технічних систем з різним принципом дії ступенів.

Ключові слова: експертні оцінки, ранжування, неспівпадаючі оцінки експертів, групове узгодження, узагальнені ранжування, вагові коефіцієнти.

Вступ

Проектування сучасного літального апарату (ЛА) або його систем прийнято розбивати на низку етапів. Зовнішнє (концептуальне) проектування є першим етапом всього життєвого циклу майбутнього технічного виробу, у якому формується його основна ідея. Методи концептуального проектування ЛА, як правило, відносяться до класу евристичних, відповідно вони найважче піддаються алгоритмізації. Проте вирішення проблем концептуального проектування можливе лише за умови його автоматизації, тобто раціонального розподілу функцій між людиною (генератором ідей) та комп'ютером, що різко підвищує ефективність та швидкість аналізу згенерованих альтернативних варіантів [1].

Система автоматизованого концептуального проектування САКОПР [2], розроблена зусиллями викладачів кафедр 103, 105 та 405 НАУ ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» – простий та зручний програмний продукт, розроблений для концептуального проектування багатоступінчастих авіаційних систем із різним принципом дії ступенів. Спочатку він створювався для розв'язання прикладної задачі концептуального проектування двоступінчастої швидкодіючої системи аварійної стабілізації динамічно подібної моделі (СДПМ), що втратила стійкість і керованість по тангажу, і показав свою ефективність і доцільність у використанні на етапі попереднього проектування також і інших складних систем.

На сьогоднішній день актуальною є розробка програмного комплексу САКОПР 2.0 з розширеними функціональними можливостями та покращеним інтерфейсом для концептуального проектування складних багатоступеневих технічних систем із різним принципом дії ступенів. Для цього використовується мате-

матичний апарат теорії нечітких множин, багатокритеріального (у тому числі і нечіткого) аналізу варіантів [3], розпізнавання образів та експертних систем.

Послідовність робіт із створення програмного комплексу САКОПР 2.0 аналогічна етапам проектування першої версії програмного продукту [2, 4]. Перший етап робіт - це розчленування створюваної системи на підсистеми, аналіз їх функціонального взаємозв'язку та пошук відносно незалежних підсистем, варіантне проектування яких не корелюється з рештою сукупності підсистем. Виняток такої підсистеми з процесу комбінування дозволяє значно скоротити кількість альтернативних варіантів, що генеруються і підлягають селекції.

Наступний етап робіт - формування напрямів проектно-конструкторського пошуку. Зупинимось на цьому етапі докладніше.

Напрями проектно-конструкторського пошуку у окремому випадку можуть збігатися з функціональним членуванням системи на підсистеми, але у загальному випадку можуть і не збігатися з ним. Розроблений метод [2, 4–7] і програмне забезпечення, що його реалізує, дозволяють розглядати кожен з напрямків евристичного пошуку як гілку з різним рівнем членування. Упорядковане розташування проектно-конструкторських рішень відповідно до принципів, методів і способів не тільки сприяє систематизованому розгляду всіх можливих підходів до вирішення цієї проблеми, але має своє функціональне значення на етапі селекції альтернативних варіантів.

Ефективність розглянутого рішення щодо кожного з показників [8] оцінюється зручним для користувача способом, наприклад, за п'ятибальною шкалою. Узагальненою характеристикою ефективності того чи іншого проектно-конструкторського рішення є ваговий коефіцієнт (який рекомендується признач-

ати у певному діапазоні, наприклад, від 0,1 до 2). Діапазон варіювання вагового коефіцієнта так само, як і решта робочих параметрів, може бути довільно обраний користувачем.

На цьому етапі [2, 4–7] передбачалося, що експерт чи група експертів, які призначають вагові коефіцієнти, мають однакові цілі та пріоритети, і при цьому не виникає конфлікту інтересів. Тобто у разі групової експертної оцінки ваговий коефіцієнт визначався внаслідок відкритого обговорення із наступним голосуванням [9]. Розглянемо ситуацію, коли рішення приймає група експертів – фахівців із різних галузей. Наприклад, у [10] передбачалося, що у групу експертів раціонально включати фахівців різного профілю: теоретиків (1), експериментаторів (2), проектувальників (3), експлуатантів (4), фахівців із розслідування льотних подій (5). Очевидно, що в цьому випадку оцінки експертів можуть мати дуже великий розкид. Тому необхідно застосувати методи побудови узагальненого ранжування альтернатив з урахуванням вагових коефіцієнтів експертів із подальшим аналізом та корекцією отриманих результатів [11, 12].

Мета статті: проаналізувати існуючі методи та підходи до знаходження вагових коефіцієнтів експертів та побудови узагальненого ранжування альтернатив в умовах неспівпадаючих оцінок експертів; розробити методіку, що дозволяє надалі розширити та доповнити функціональні можливості програмного комплексу САКОПР для концептуального проектування складних багатоступеневих технічних систем з різним принципом дії ступенів.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо задачу формалізації групового оцінювання альтернатив. Нехай m експертів оцінили n альтернатив за l показниками. В результаті отримано величини x_{ij}^h ($i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$; $h = \overline{1, l}$). Тут можливі два випадки:

1) x_{ij}^h отримані методами безпосередньої оцінки або методом послідовного порівняння, тобто величини x_{ij}^h є числами або балами;

2) оцінка альтернатив здійснена методом ранжування, і величини x_{ij}^h є рангами.

У цій статті розглянемо випадок 1. Виконаємо розрахунок вагових коефіцієнтів експертів методом, описаним у [9, 13]. Передбачається, що компетентність експертів має оцінюватись за ступенем узгодженості їх оцінок із груповою оцінкою альтернатив.

Алгоритм обчислення групових оцінок має вигляд рекурентної процедури:

1) початкові умови при $t = 0$

$$x_i^0 = 1/m \quad (j = \overline{1, m});$$

2) рекурентні співвідношення для x :

а) $x_i^t = \sum_{j=1}^m x_{ij}^t k_j^{t-1}$ ($i = \overline{1, n}$) – групова оцінка для

i -го об'єкта на t -му кроці на основі індивідуальних оцінок x_{ij} ;

б) $\lambda^t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^t x_{ij}$ ($t = 1, 2, \dots$) – нормувальний

коефіцієнт;

в) $k_j^t = \frac{1}{\lambda^t} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^t$ ($j = \overline{1, m-1}$) – коефіцієнти

компетентності j -го експерта на t -му кроці;

г) $k_m^t = 1 - \sum_{j=1}^{m-1} k_j^t$ – коефіцієнти компетентності

m -го експерта з умови нормування;

3) ознака закінчення ітераційного процесу

$$\max \left(\left| x_i^t - x_i^{t-1} \right| \right) < E.$$

У [9] досліджено питання збіжності аналізованої рекурентної процедури і показано, що з невід'ємності і нерозкладності матриць B і C умови збіжності завжди виконуються в практичних задачах. Тут

$$B = A \cdot A^T, \quad C = A^T \cdot A, \quad A = \|x_{ij}\|.$$

При оцінці та ранжируванні альтернатив експерти часто розходяться у своїх оцінках. Тому важливою є кількісна оцінка ступеня згоди експертів. Якщо кількість альтернатив $n \leq 7$, то як таку оцінку використовують дисперсійний коефіцієнт конкордації, що визначається як відношення оцінки дисперсії до максимального значення цієї оцінки

$$W = D/D_{\max}.$$

Якщо кількість альтернатив $n > 7$, то оцінка значущості коефіцієнта конкордації може бути здійснена за критерієм χ^2 :

$$\chi^2 = 12S / \left(mn(n+1) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m T_j \right).$$

Тут $S = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} - \bar{r} \right)^2$, де $\|r_{ij}\|$ – матриця ранжу-

вання альтернатив; $T_j = \sum_{k=1}^{H_j} (h_k^3 - h_k)$, де T_j – показник пов'язаних рангів у j -му ранжуванні; h_k – число рівних рангів у k -й групі пов'язаних рангів при ранжируванні j -м експертом.

Якщо співпадаючих рангів немає, то $H_j = 0$, $h_k = 0$ і, отже, $T_j = 0$. Діапазон значень коефіцієнта конкордації $W \in [0, 1]$.

У випадку, коли всі експерти дають однакові оцінки, $W = 1$. За повної відсутності узгодженості оцінок маємо $W = 0$. Зауважимо, що для цієї задачі

коректніше використовувати підхід, запропонований у роботі [14] у разі нестроного ранжирування за наявності зв'язаних рангів:

$$W = 12 S(\Delta^2) / \left(m^2(n^3 - n) - (2m - p) \sum_{j=1}^m T_j \right), \quad (1)$$

де p – кількість експертів, у ранжируваннях яких є рівні ранги.

Для оцінки рівня узгодженості думок усіх експертів щодо рангу однієї альтернативи обчислюють коефіцієнт варіації. Оскільки в розглянутій задачі необхідно враховувати інформацію про відстань між рангами, було обрано коефіцієнт варіації Беккера:

$$V_i^B = \sum_{j=1}^n \sum_{k>j} (x_{ij} x_{ik} (k - j)) / C_m^2, \quad V^B \in [0, n/2], \quad (2)$$

де C_m^2 – число сполучень з n по 2.

Збільшення значення коефіцієнта означає розкид оцінок експерта щодо відповідної альтернативи.

При аналізі результатів може бути корисним коефіцієнт варіації, розрахований за елементами узагальненого вектор значущості [15]:

$$V = \sqrt{n \sum_{i=1}^n (\lambda_i^* - 1/n)^2}, \quad (3)$$

де λ_i^* – узагальнена значущість i -го об'єкта. Він дозволяє оцінити відмінність альтернатив по відношенню один до одного. Чим ближче значення коефіцієнта V до одиниці, тим більше відчутна різниця між значущістю провідних альтернатив та значущістю альтернатив-аутсайдерів.

Розрахунок коефіцієнтів компетентності експертів та узагальненої оцінки альтернатив також можна здійснити за формулами:

$$B \bar{x} = \lambda_B \bar{x}, \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1, \quad |B - \lambda_B E| = 0, \quad (4)$$

$$C \bar{k} = \lambda_C \bar{k}, \quad \sum_{j=1}^m k_j = 1, \quad |C - \lambda_C E| = 0,$$

де \bar{x}, \bar{k} – власні вектори матриць B і C , що відповідають максимальним власним числам λ_B і λ_C цих матриць.

Далі перейдемо до побудови та розрахунку узагальненого ранжування альтернатив, елементи якого задамо за правилами:

$$y_{ik}^j = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq x_{kj}, \\ 0, & x_{ij} > x_{kj}, \end{cases} \quad (5)$$

де x_{ij}, x_{kj} – ранги, присвоєні j -м експертом i -й і k -й альтернативам.

Узагальнене ранжування побудуємо як матрицю парних порівнянь, яка найкращим чином узгоджується з матрицями парних порівнянь кожного експерта з урахуванням вагових коефіцієнтів експертів за допомогою метрики:

$$\|y_{ik}^*\| = \arg \min_{\|y_{ik}\|} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n k_j |y_{ik}^j - y_{ik}|. \quad (6)$$

Тоді узагальнене ранжування знаходимо як:

$$y_{ik}^* = \begin{cases} 1, & \text{якщо } b_{ik} \geq 1/2, \\ 0, & \text{якщо } b_{ik} < 1/2, \end{cases} \quad (7)$$

де $b_{ik} = \sum_{j=1}^m k_j y_{ik}^j$ – ймовірність того, що i -я альтернатива краще за k -ту.

Для побудови та розв'язання модельної задачі візьмемо дані з критеріальної бази [10]. Вона була розроблена для аналізу застосування методу експериментальних досліджень на вільнолітаючих динамічно подібних моделях літаків при дослідженні катастрофи Airbus A300/600R під Нью-Йорком 12.11.2001 р.

Вихідні дані задачі представлені у табл. 1.

Таблиця 1 – Критеріальна база для ранжування можливих методів

Експерт	1	2	3	4	5
1. Можливість урахування факторів:					
— короткоперіодичного руху по тангажу	9	8	10	8	10
— довгоперіодичного руху по тангажу	9	8	10	8	10
— руху по крену	10	9	10	9	10
— тривимірного руху	9	8	10	7	10
— зривного обтікання	8	7	9	7	8
— звалювання та штопору	8	8	8	7	9
— відділення елементів конструкції та скидання підвісних вантажів	10	9	9	8	10
— статичних аеропружних процесів	9	7	7	8	8
— коливальних аеропружних процесів, флаттера	7	6	6	7	8
— явищ автоаеропружності	5	5,5	6	5	8
— особливостей роботи САУ	8	8	9	7	8
— відмов у роботі САУ	7	7,5	8	7	8
— особливостей дій екіпажу	8	8	9	7	9
— помилок екіпажу	7	5	9	7	8
2. Можливість застосування в умовах неповної інформації	3	8	7	3	7
3. Витрати часу на отримання результату	5	7	7	5	7
4. Матеріальні витрати на отримання результату	3	2	5	3	5

Складемо матрицю оцінок альтернатив експертами:

$$A = \|a_{ij}\|_{7 \times 5} = \begin{pmatrix} 9 & 8 & 10 & 8 & 10 \\ 8 & 7 & 9 & 7 & 8 \\ 7 & 6 & 6 & 7 & 8 \\ 8 & 8 & 9 & 7 & 9 \\ 3 & 8 & 7 & 3 & 7 \\ 5 & 7 & 7 & 5 & 7 \\ 3 & 2 & 5 & 3 & 5 \end{pmatrix}.$$

Обчислимо вагові коефіцієнти експертів та групову оцінку альтернатив за допомогою описаної вище рекурентної процедури. Результати розрахунків першого, другого та третього наближень наведено у табл. 2, де позначено: Σ^* – суми рангів за альтернативами

Результати обчислення дисперсійного коефіцієнта конкордації експертів за формулою (1) наведено у табл. 3. У нашому випадку $W = 0,75$, що свідчить про досить високу узгодженість оцінок експертів. Діапазон можливих значень коефіцієнта варіації Беккера в умовах даної задачі – $V^B \in [0; 3,5]$.

Результати розрахунків коефіцієнта варіації Беккера за формулою (2) наведено у табл. 4. На рис. 1 представлені значення коефіцієнтів варіації Беккера альтернатив 1-7. Найбільш спірною для експертів виявилася альтернатива 5, найменші розбіжності викликали альтернативи 4, а також 2, 3 та 7.

Діапазон можливих значень коефіцієнта варіації Беккера в умовах даної задачі – $V^B \in [0; 3,5]$. Результати розрахунків коефіцієнта варіації Беккера за формулою (2) наведено у табл. 4.

На рис. 1 представлені значення коефіцієнтів варіації Беккера альтернатив 1-7.

Найбільш спірною для експертів виявилася альтернатива 5, найменші розбіжності викликали альтернативи 4, а також 2, 3 та 7.

Таблиця 2 – Розрахунок узагальненого ранжування альтернатив та вагових коефіцієнтів експертів

Номер ітерації t	1	2	3
Групова оцінка для i -ї альтернативи	$\begin{pmatrix} 0,19 \\ 0,17 \\ 0,14 \\ 0,17 \\ 0,08 \\ 0,13 \\ 0,12 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,24 \\ 0,2 \\ 0,13 \\ 0,19 \\ 0,04 \\ 0,11 \\ 0,09 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,29 \\ 0,21 \\ 0,12 \\ 0,19 \\ 0,02 \\ 0,11 \\ 0,06 \end{pmatrix}$
Нормувальний коефіцієнт λ^t	1690,4	1335,86	1461,25
Коефіцієнти компетентності j -го експерта	$\begin{pmatrix} 0,19 \\ 0,19 \\ 0,22 \\ 0,17 \\ 0,23 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,19 \\ 0,192 \\ 0,221 \\ 0,173 \\ 0,224 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,19 \\ 0,19 \\ 0,22 \\ 0,18 \\ 0,22 \end{pmatrix}$

Таблиця 3 – Розрахунок дисперсійного коефіцієнта конкордації експертів

a_i	Ранжування експертів					Σ^*	Δ_i^2
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5		
1	9	8	10	8	10	45	127,37
2	8	8	9	7	9	41	53,08
3	7	6	6	7	8	34	0,08
4	8	7	9	7	8	39	27,94
5	3	2	5	3	5	18	246,94
6	5	7	7	5	7	31	7,37
7	3	8	7	3	7	28	32,65
H_j	2	2	2	2	2	$W = 0,75$	
h_k	2	2	2	2	2		
	2	3	2	3	2		
T_j	12	30	12	30	12		

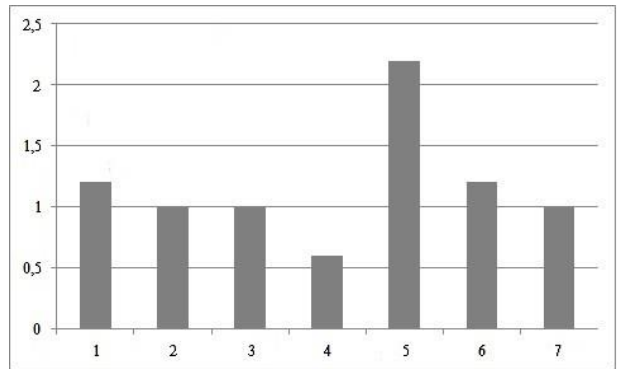


Рис. 1. Значення коефіцієнтів варіації Беккера

Таблиця 4 – Розрахунок коефіцієнтів варіації Беккера

Альтернативи	Ранги								V_i^B
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	2	1	2	-	-	-	-	-	1,2
2	-	1	2	2	-	-	-	-	1
3	-	-	1	2	2	-	-	-	1
4	-	1	2	1	-	-	-	-	0,6
5	-	-	1	2	-	-	2	-	2,2
6	-	-	-	3	-	2	-	-	1,2
7	-	-	-	-	-	2	2	1	1

Далі наведено результати розрахунку узагальненого ранжування альтернатив та вагових коефіцієнтів експертів другим методом за формулами (4) – (7):

$$B = \begin{pmatrix} 409 & 372 & 307 & 354 & 167 & 281 & 255 \\ 354 & 322 & 265 & 307 & 144 & 243 & 220 \\ 307 & 279 & 234 & 265 & 124 & 210 & 188 \\ 372 & 339 & 279 & 322 & 151 & 257 & 235 \\ 255 & 235 & 188 & 220 & 104 & 184 & 180 \\ 281 & 257 & 210 & 243 & 114 & 197 & 184 \\ 167 & 151 & 124 & 144 & 72 & 114 & 104 \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} 301 & 299 & 347 & 276 & 353 \\ 299 & 330 & 366 & 276 & 371 \\ 347 & 366 & 421 & 319 & 424 \\ 276 & 276 & 319 & 254 & 326 \\ 353 & 371 & 424 & 326 & 432 \end{pmatrix};$$

$$\bar{y} = \begin{pmatrix} 2,96 \\ 2,21 \\ 2,56 \\ 2,7 \\ 1,21 \\ 1,89 \\ 2,05 \end{pmatrix}; \quad \bar{x} = \begin{pmatrix} 0,19 \\ 0,14 \\ 0,16 \\ 0,17 \\ 0,08 \\ 0,12 \\ 0,13 \end{pmatrix}; \quad \bar{y} = \begin{pmatrix} 3,14 \\ 3,26 \\ 3,73 \\ 2,89 \\ 4,15 \end{pmatrix}; \quad \bar{k} = \begin{pmatrix} 0,18 \\ 0,19 \\ 0,22 \\ 0,17 \\ 0,24 \end{pmatrix}.$$

Результати побудови та розрахунку узагальненого ранжування альтернатив наведено у табл. 5-6.

Знайдене за формулою (3) значення коефіцієнта варіації $V = 0,455$, розрахованого за елементами узагальненого вектора значущості, свідчить про відсутність відчутної різниці між найкращими та найгіршими альтернативами. На рис. 2 представлені результати узагальненого ранжування альтернатив, побудованого двома методами. В обох випадках найбільший рейтинг мають альтернативи 1, 2, 4, а найменший – альтернативи 5 та 7.

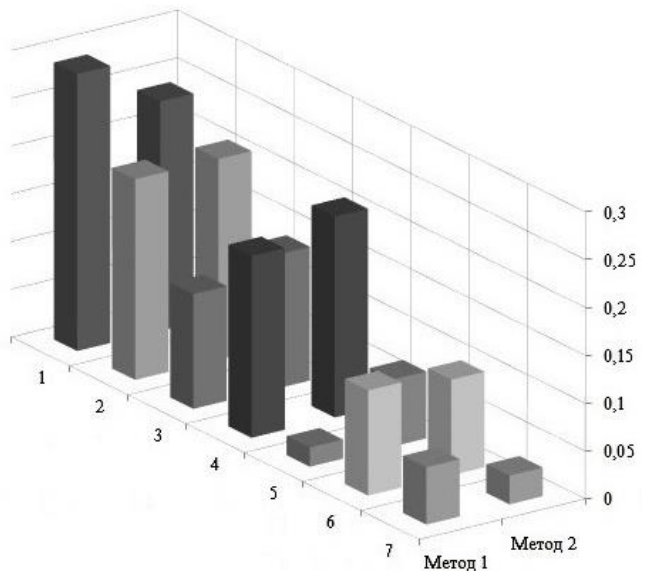


Рис. 2. Узагальнене ранжування альтернатив

Таблиця 5 – Розрахунок узагальненого ранжування альтернатив

№ 1	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	1	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	0
4	1	1	0	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	0	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1

№ 2	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	1	1	0	0
2	1	1	0	1	1	1	0
3	1	1	1	1	1	1	0
4	1	0	0	1	1	0	0
5	1	0	0	1	1	0	0
6	1	1	0	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1

№ 3	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	1	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	0
4	1	1	0	1	0	0	0
5	1	1	0	1	1	1	0
6	1	1	0	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1

№ 4	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	0	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1

№ 5	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	0
4	1	0	0	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	0
6	1	1	1	1	0	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1

Таблиця 6 – Узагальнене ранжування об'єктів з урахуванням коефіцієнтів компетентності експертів

a_i	1	2	3	4	5	6	7	λ_i^*
1	1	0	0	0	0	0	0	0,24
2	1	1	0	1	0	0	0	0,21
3	1	1	1	1	0	0	0	0,14
4	1	1	0	1	0	0	0	0,21
5	1	1	1	1	1	1	0	0,07
6	1	1	1	1	0	1	0	0,1
7	1	1	1	1	1	1	1	0,03
Суми	7	6	4	6	2	3	1	1
$V = 0,455$								

Значення вагових коефіцієнтів експертів, отриманих у результаті розрахунків двома методами, також узгоджуються. Точніші значення отримані в результаті обчислень за допомогою рекурентної процедури (метод 1).

Висновки

Проаналізовано методи групової оцінки об'єктів вибору та оцінки ступеня компетентності експерта в умовах неспівпадаючих оцінок експертів.

Розроблений у роботі підхід побудови узагальненого ранжування альтернатив та визначення вагових коефіцієнтів експертів із застосуванням методів

статистичної обробки експертних оцінок при груповому узгодженні може бути використаний на етапі концептуального проектування складних технічних систем з різним принципом дії ступенів.

Подальші дослідження доцільно проводити у напрямі синтезу узагальненої оцінки експертів алгебраїчними методами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Lievi L. Сучасні інтелектуальні методи моделювання складних технологічних об'єктів / L. Lievi, O. Zuma // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2021. – С. 49–53.
- Концепции развития современной авиационной техники основных назначений [Текст] : инновац. учеб. для неавиационных специальностей аэрокосм. ун-та / В. А. Богуслаев, А. И. Рыженко, Е. А. Мураховская, Р. Ю. Цуканов. — Запорожье : Просвіта, 2020. – 707 с.
- Шевченко С. В. Про концепцію векторної оптимізації в задачах багатокритеріального вибору / С. В. Шевченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – 2022. – № 1 (7). – С. 46–50.
- Мураховська О. А. Технологія пошуку оптимальних концептуальних рішень багатуступінчастих авіаційних систем з різним принципом дії ступенів / О. А. Мураховська // Вісник Харківського університету. Серія: Актуальні проблеми сучасної науки в дослідженнях молодих вчених м. Харкова. – 2001. – № 506. – Ч. 2. – С. 138–140.
- Риженко О. І. Особливості вибору цільової функції при оптимальному проектуванні систем вільнолітаючих динамічно подібних моделей літаків / О. І. Риженко, О. А. Мураховська // Авиационно-космическая техника и технология. Труды НАКУ "ХАИ". – 2001. – Вып. 25. – С. 165–171.
- Мураховська О. А. Розробка критеріальної бази для технології оптимального проектування багатуступінчастих авіаційних систем / О. А. Мураховська // Вісник Харківського університету. Серія: Актуальні проблеми сучасної науки в дослідженнях молодих вчених м. Харкова. – 2002. – № 551. – Ч. 2. – С. 217–222.
- Мураховская Е. А. Автоматизация предварительного проектирования устройств аварийной стабилизации свободнолетающих моделей самолетов для исследования особых полетных ситуаций / Е. А. Мураховская // Возможности использования методов механики для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали ІХ міжвуз. наук.-практ. конф., [Харків] / Нац. ун-т цив. зах. України. – Харків, 2010. – С. 32–33.
- Шефер О. В. Дослідження процесу прийняття рішень у складних технічних системах / О. В. Шефер, О. І. Лактіонов, О. В. Михайленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2022. – Т. 1 (67). – С. 34–37.
- Афоничкин А. И. Управление решения в экономических системах : учебн. для вузов / А. И. Афоничкин, Д. Г. Михаленко. – СПб. : Питер, 2009. – 480 с.
- Критеріальна база ранжирования альтернативных методов исследования проблем безопасности полетов в условиях неопределенности проектирования самолетов гражданского назначения / В. А. Макаричев, Е. А. Мураховская, А. И. Рыженко, Ю. А. Шербакова // Открытые информационные и компьютерные технологии. – 2012. – Вып. 57. – С. 197–206.
- Цукерман Е. В. О согласовании экспертных оценок / Е. В. Цукерман, В. Е. Цукерман // Исследования по информатике. – 2002. – Вып. 4. – С. 3–20.
- Бешелев С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – М. : Статистика, 1980. – 263 с.
- Павлов А. Н. Методы обработки экспертной информации : учеб.-метод. пос. / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб. : ГУАП, 2005. – 42 с.
- Горелик А. Л. К вопросу расчета коэффициента согласованности экспертных оценок в задаче группового выбора и принятия решений / А. Л. Горелик, Л. Ч. Абаев // Кибернетика. – 1990. – №3. – С. 65–69.
- Анохин А. Н. Методы экспертных оценок : учеб. пособ. / А. Н. Анохин. – Обнинск : ИАТЭ, 1996. – 148 с.

Received (Надійшла) 30.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

**Analysis of applicability of methods of statistical processing of expert estimates
at the stage of preliminary design of complex technical devices**

O. Murahovska, N. Ukrayinets

Abstract. Topicality. Today, the development of the SAKOPR 2.0 software complex with extended functionality and an improved interface is relevant. The complex is needed for the conceptual design of complex multi-stage technical systems. **Research methods.** Mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets, multi-criteria analysis of options, pattern recognition and expert systems. **The purpose of the article:** to analyse existing methods and approaches to finding weighting coefficients of experts and building a generalized ranking of alternatives in conditions of inconsistent expert assessments. It is also necessary to develop a methodology that allows further expanding and supplementing the functionality of the SAKOPR software complex. The results obtained. The main properties of statistical estimates, which reflect the consistency of expert opinions, are considered. Indicators that allow assessing the multiple consistency of opinions regarding one or more objects of expertise are analyzed. The application of methods of statistical processing of expert estimates in group coordination in the case of multidirectional indicators is described. It includes an analysis of the consistency of expert opinions, the construction of a generalized ranging, and the calculation of expert weight coefficients. The possibility of using the developed technique at the stage of preliminary design of complex technical systems with different principles of operation of stages is shown. **Conclusion.** The approach developed in the work can be used at the stage of conceptual design of complex technical systems with different principles of influence of degrees.

Keywords: expert estimations, ranking, dissenting expert's opinions, group agreement, generalized rankings, weight coefficients.

В. І. Носков, В. В. Скороделов, Г. В. Гейко, О. В. Липчанська

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

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА

Анотація. В існуючій системі управління тяговим приводом використовуються переважно пропорційні, пропорційно-інтегральні та пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори, які мають універсальність і надійну роботу. Однак, вони не забезпечують високої якості регулювання і уступають мікропроцесорним системам оптимального управління. В статті розглядається питання управління тяговим електроприводом постійного струму електропоїзда, яке дозволяє мінімізувати енергетичні витрати поїзда при русанні з місця і розгоні. На розробленій математичній моделі тягового електропривода за допомогою принципу максимуму Понтрягіна і дужок Пуассона вирішена задача синтезу оптимальних керувань пусковим резистором. Проведені дослідження при різних режимах розгону електропоїзда показали задовільну точність моделювання цих процесів. Отримана структура регулятора, який забезпечує оптимальний розгін електропоїзда з істотною економією енергоресурсів. Оскільки ці розрахунки не є трудомісткими, їх може здійснювати бортовий обчислювальний пристрій, який буде видавати рекомендації машиністу щодо режиму руху поїзда.

Ключові слова: тяговий електропривід, принцип максимуму, пусковий резистор.

Вступ

Енергозбереження тяговим рухомим складом (ТРС) України займає особливе місце, тому що основна частина вантажних і пасажирських перевезень виконується залізничним транспортом. Для приміських пасажирських перевезень із контактної мережею 3 кВ постійного струму використовуються електропоїзди ЕР2, ЕР2Т і ЕПЛ2Т, які були випущені Ризьким вагонобудівним заводом і ВАТ «Луганськтепловоз» [1, 2]. У цих поїздах застосоване реостатне регулювання струму колекторних тягових двигунів (ТД) у режимі русання з місця і розгону. Пускові резистори включені послідовно в ланцюг живлення ТД і, у міру розгону поїзда, контакторами виводяться зі схеми. На електропоїздах ЕР2 на початку пуску всі чотири ТД моторних вагонів спочатку з'єднані послідовно, а потім відбувається їх через'єднання у дві паралельні гілки – по два ТД послідовно. В електропоїздах ЕР2Т і ЕПЛ2Т всі чотири ТД з'єднані послідовно. Після виходу ТД на природну характеристику (пускові резистори виведені зі схеми), їх подальше управління здійснюється паралельним підключенням до їх обмоток збудження шунтувальних резисторів (режим послаблення поля).

Зазначені електропоїзди перебувають в експлуатації досить довгий час, економія енергоресурсів на них може бути виконана шляхом удосконалення управління енергетичним устаткуванням і оптимізацією управління рухом з використанням засобів обчислювальної техніки. Особливу увагу заслуговує оптимізація режиму русання з місця і розгону, як найбільш енергозатратні для будь-якого типу ТРС [3, 4], насамперед, для приміських поїздів.

Аналіз літератури. Енергозбереження є актуальною проблемою, про що свідчать відповідні публікації. Як видно з літературних джерел, питання оптимальної експлуатації ТРС може бути розкладено на два взаємозалежні завдання, які в першому наближенні можна розглядати як незалежні: оптимальне управління енергетичним устаткуванням і оптимальне управління рухом поїзда [5, 6]. Для ТРС, що

тривалий час перебуває в експлуатації, до цього варто додати питання необхідності модернізації системи управління (СУ) на базі застосування сучасних засобів обчислювальної техніки. В існуючій СУ використовуються переважно пропорційні, пропорційно-інтегральні та пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори, які мають універсальність і надійну роботу. Однак, вони не забезпечують високої якості регулювання і уступають мікропроцесорним системам оптимального управління.

У цій статті розглядається питання управління тяговим електроприводом постійного струму електропоїзда, яке дозволяє мінімізувати енергетичні витрати поїзда при русанні з місця і розгоні.

Основна частина

Програмні закони управління мають відомі недоліки, тому розглянемо можливість синтезу регулятора для управління розгоном електропоїзда. При синтезі оптимальних регуляторів для управління складними нелінійними об'єктами дуже важливо вибрати правильну стратегію синтезу. Для приводу постійного струму електропоїзда доцільно вибрати стратегію, що передбачає пошук регулятора у два етапи. На першому етапі виконується синтез оптимального регулятора за допомогою спрощеної моделі, а на другому етапі – перевірка і уточнення отриманого регулятора або закону управління на реальному об'єкті, або більш повної та точної моделі, що могла б дати відповідь із приводу практичної цінності тієї або іншої пропозиції. Структурна схема розглянутого об'єкта управління представлена на рис. 1.

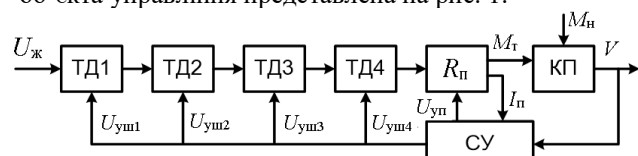


Рис. 1. Структурна схема об'єкта управління

На рис. 1 прийняті наступні позначення: $U_{ж}$ – напруга живлення контактної мережі; ТД1, ..., ТД4 – тягові електродвигуни постійного струму з послідов-

ним збудженням; $U_{yш1}, \dots, U_{yш4}$ – сигнали управління шунтувальними резисторами обмоток збудження тягових двигунів; R_n – пусковий (додатковий) резистор; U_{yn} – сигнал управління пусковим резистором; M_T – тяговий момент електропривода; M_n – момент навантаження; V – швидкість електропоїзда; I_n – струм у ланцюзі пускового резистора; КП – колісна пара.

Сигнал U_{yn} управляє величиною опору резистора R_n , обмежуючи пусковий струм двигунів. При досягненні швидкості електропоїзда 50-60 км/год зростає ЕРС двигунів, а опір R_n зменшується до нуля. Із цього моменту подальше збільшення швидкості електропоїзда здійснюється за допомогою формування сигналів управління приводом $U_{yш1}, \dots, U_{yш4}$, по яких виробляється шунтування обмоток збудження ТД. На рис. 2 наведена схема заміщення електродвигуна постійного струму послідовного збудження з елементами управління.

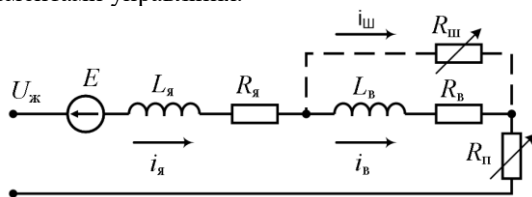


Рис. 2. Схема заміщення електродвигуна постійного струму з елементами управління

На рис. 2 прийняті наступні позначення: $U_ж$ – напруга живлення тягового двигуна; E – ЕРС двигуна; $i_я, L_я, R_я$ – струм, індуктивність і опір якірного ланцюга двигуна; $i_з, L_з, R_з$ – струм, індуктивність і опір обмотки збудження; $i_ш, R_ш$ – струм і опір ланцюга шунтувального резистора; R_n – пусковий резистор. Внаслідок того, що на етапі розгону електропоїзда до швидкості приблизно 60 км/год управління електроприводом виконується тільки шляхом зміни опору R_n , можна спростити схему заміщення, виключивши з неї шунтувальний резистор $R_ш$, що дає можливість замінити індуктивності та опори якірного ланцюга і ланцюга збудження еквівалентними (рис. 3). Крім того, при розробці спрощеної математичної моделі об'єкта управління для рішення зазначеного завдання оптимального управління чотири окремих тягових двигуни можуть бути замінені одним еквівалентним двигуном.

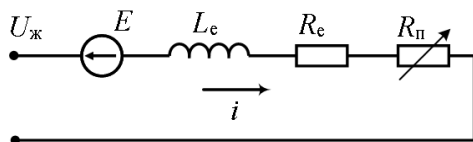


Рис. 3. Спрощена схема заміщення тягового двигуна

На рис. 3 прийняті такі позначення: $L_е = L_я + L_з$; $R_е = R_я + R_з$. Зі спрощеної еквівалентної схеми заміщення ТД нескладно одержати диференціальне рівняння, яке описує зміну струму двигуна [6]:

$$L_е \frac{di}{dt} = U_ж - E - R_е i - R_n i, \quad (1)$$

де $L_е$ – індуктивність обмоток двигуна; i – струм двигуна; $U_ж$ – напруга живлення; $E = C_e \Phi_\delta n$ – ЕРС

ТД; C_e – постійна величина; $\Phi_\delta = \gamma(1 - e^{\beta i})$ – потік ТД; γ, β – постійні величини кривої намагнічування; n – частота обертання ТД; $R_е$ – опір обмоток ТД; R_n – опір пускового резистора.

В результаті математичних перетворень і групування постійних величин з рівняння (1) одержимо рівняння струму в ланцюзі ТД:

$$\frac{di}{dt} = a_{10} + a_{11}n + a_{12}ne^{\beta i} + a_{13}i + a_{14}u, \quad (2)$$

де $u = R_n i$ – управління U_{yn} (напруга на пусковому резисторі); $a_{10} = U_ж / L_е$; $a_{11} = -C_e \gamma / L_е$; $a_{12} = -a_{11}$; $a_{13} = -R_е / L_е$; $a_{14} = -1 / L_е$.

Частота обертання ТД може бути отримана з математичної моделі руху поїзда [6]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_n, \quad (3)$$

де J – момент інерції; ω – кутова швидкість; M_T – момент тяги; M_n – момент навантаження.

Для збільшення тягового моменту використовується редуктор з передатним числом μ , при цьому досягається збільшення результуючого моменту в μ раз, але зменшується частота обертання колісних пар в μ раз. Внаслідок того, що момент тяги моторного вагона дорівнює сумі моментів тяги всіх ТД із урахуванням передатного числа тягового редуктора μ , то прийнявши допущення, що всі ТД ідентичні та відсутнє боксування колісних пар, момент тяги може бути визначений по рівнянню:

$$M_m = 4\mu M_\delta = 4\mu C_m \Phi_\delta i, \quad (4)$$

де μ – передатне число редуктора; M_δ – момент тяги одного ТД; C_m – постійна величина.

Момент навантаження визначається з рівнянь:

$$M_n = jW_0 F_3 R_k, \quad (5)$$

$$W_0 = \frac{1}{1000} (a_0 + a_1 V + a_2 V^2), \quad (6)$$

$$V = \omega R_k, \quad (7)$$

$$F_c = mg, \quad (8)$$

де j – коефіцієнт ухилу шляху (для горизонтальної ділянки $j=1$); W_0 – удільний опір руху; F_3 – зчіпна вага; R_k – радіус моторного колеса; a_0, a_1, a_2 – постійні величини; V – швидкість поїзда; m – маса поїзда; g – прискорення вільного падіння.

Момент інерції J визначається з рівняння:

$$J = mR_k^2, \quad (9)$$

а частота обертання ТД зв'язана зі швидкістю руху поїзда наступним співвідношенням:

$$n = \mu\omega / (2\pi). \quad (10)$$

Для визначення частоти обертання ТД скористаємося рівняннями (3 – 10). У результаті ряду математичних перетворень і групування постійних величин одержимо диференціальне рівняння частоти обертання ТД:

$$\frac{dn}{dt} = a_{20} + a_{21}i + a_{22}ie^{\beta i} + a_{23}n + a_{24}n^2, \quad (11)$$

$$\text{де } a_{20} = \frac{-\mu j g a_0}{2\pi R_k 1000}; \quad a_{21} = \frac{\mu^2 4 C_M \gamma}{2\pi m R_k^2 1000};$$

$$a_{22} = -a_{21}; \quad a_{23} = \frac{-j g a_1 3,6}{1000}; \quad a_{24} = \frac{-j g a_2 2\pi 3,6^2}{1000\mu}.$$

В результаті одержуємо спрощену математичну модель об'єкта управління у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = a_{10} + a_{11}n + a_{12}ne^{\beta i} + a_{13}i + a_{14}u, \\ \frac{dn}{dt} = a_{20} + a_{21}i + a_{22}ie^{\beta i} + a_{23}n + a_{24}n^2. \end{cases} \quad (12)$$

Дослідження, проведені з використанням (12), показали відповідність процесів, знятих з моделі, процесам, що протікають у реальному об'єкті.

При розгоні електропоїзда, використовуючи можливість управління пусковим резистором $R_{п}$, ставиться завдання знаходження оптимальних керувань із урахуванням заданого критерію якості. Для рішення завдання пошуку оптимального управління визначимо мінімізуючий функціонал, що являє собою лінійну зважену комбінацію квадрата управління і часу розгону електропоїзда

$$I = \int_0^{t_k} (k_1 + k_2 u^2) dt, \quad (13)$$

де t_k – час розгону електропоїзда; k_1, k_2 – постійні коефіцієнти. Одним з варіантів рішення сформульованого завдання може бути використання принципу максимуму Понтрягіна [7 – 9]. Основні співвідношення в цьому випадку мають вигляд:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \psi_i}, \quad x_i(0) = x_{i0}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (14)$$

$$\frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (15)$$

$$H = \psi_1 f_1(x_1, x_2, u) + \psi_2 f_2(x_1, x_2) + \psi_0 (k_1 + k_2 u^2), \quad (16)$$

$$H(x_i(t), \psi_i(t), u(t)) = \max_{u \in D} H(x_i(t), \psi_i(t), u(t)), \quad (17)$$

де x_0 – нова фазова координата системи; H – гамільтоніан системи; ψ_i ($i = 0, 1, 2$) – сполучені функції; $f_1(x_1, x_2, u)$, $f_2(x_1, x_2)$ – праві частини рівнянь (12); D – область припустимих керувань. Оскільки гамільтоніан системи не залежить явно від часу, то

$$H = \text{const} = 0. \quad (18)$$

Якщо управління u перебуває усередині припустимої області керувань D , то справедливо:

$$\Phi = \frac{\partial H}{\partial u} = \psi_1 \frac{\partial f_1}{\partial u} + \psi_2 \frac{\partial f_2}{\partial u} + \psi_0 \frac{\partial (k_1 + k_2 u^2)}{\partial u} = 0. \quad (19)$$

В силу однорідності гамільтоніана H по ψ_i оптимальне управління визначається не значеннями ψ_i , а їхнім відношенням до однієї із них.

Оскільки $\frac{\partial H}{\partial x_0} \equiv 0$, то з виразу (15) виходить, що

$\psi_0 = \text{const}$, тому можна прийняти $\psi_1 = -1$.

Таким чином, маємо два рівняння (18), (19), що містять ψ_1, ψ_2, x_1, x_2 та управління u . Для виключення сполучених змінних ψ_1, ψ_2 необхідне третє рівняння, одержане за допомогою дужок Пуассона [9]:

$$\begin{aligned} [H\Phi] &= \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial \Phi}{\partial \psi_1} - \frac{\partial H}{\partial \psi_1} \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial \Phi}{\partial \psi_2} - \\ &- \frac{\partial H}{\partial \psi_2} \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} = (\psi_1 (a_{12} \beta x_2 e^{\beta x_1} + a_{13}) + \psi_2 (a_{21} + \\ &+ a_{22} e^{\beta x_1} + a_{22} \beta x_1 e^{\beta x_1})) a_{14}. \end{aligned} \quad (20)$$

Рівняння (16), (18), (19) лінійні щодо сполучених змінних ψ_1 і ψ_2 , тому виключити їх із цих рівнянь не складно і в результаті одержимо вирази виду:

$$A_2 u^2 + A_1 u + A_0 = 0, \quad (21)$$

де $A_2 = k_2; A_0 = -k_1;$

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{2k_2}{a_{14}} [a_{10} + a_{11}x_2 + a_{12}x_2 e^{\beta x_1} + a_{13}x_1 - \\ &- ((a_{12} \beta x_2 e^{\beta x_1} + a_{13})(a_{20} + a_{21}x_1 + a_{22}x_1 e^{\beta x_1} + \\ &+ a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2) / (a_{21} + a_{22} e^{\beta x_1} + a_{22} \beta x_1 e^{\beta x_1}))]. \end{aligned}$$

Із рівняння (21) при відомих фазових координатах x_1, x_2 можна визначити оптимальне управління за умови, що воно перебуває усередині припустимої області керувань $u_1 \in D$:

$$u_1 = \frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_0A_2}}{2A_2}. \quad (22)$$

В іншому випадку користуватися рівнянням (21) не можна, тому що воно отримано в припущенні, що з розгляду виключені граничні значення управління, які можуть бути знайдені за допомогою більш складного виразу (17). Оскільки в розглянутій задачі область припустимих управлінь задається у вигляді інтервалу $[0 \leq u \leq U_{\max}]$, а згідно з законами фізики не може бути миттєвих перемикань управління з нижнього граничного значення у верхнє і навпаки, то за допомогою співвідношення (22) можемо одержати вираз для визначення оптимального управління з урахуванням заданої області обмежень рівняння:

$$u = \begin{cases} 0, & \text{якщо } u_1 \leq 0, \\ u_1, & \text{якщо } 0 \leq u_1 \leq U_{\max}, \\ U_{\max}, & \text{якщо } u_1 \geq U_{\max}. \end{cases} \quad (23)$$

Сигнали струму і частоти обертання двигуна (i та n відповідно) обчислюються по рівняннях (2) та (11). Постійні коефіцієнти обчислюються виходячи з параметрів і характеристик двигуна й об'єкта управління. Блок «R» формує управління згідно виразу (22), а наступний за ним блок обмежує сигнал управління u по виразу (23). Математичне моделювання розгону поїзда згідно з виразами (22), (23),

підтвердило його працездатність і дозволило одержати більш економічні режими. Наявність математичної моделі дозволило провести уточнення системи управління електропоїздів ЕПЛ2Т і їх успішне випробування, а також задачу в експлуатацію. Одержані експериментальні дані підтвердили якість досліджень на моделі (похибка моделювання не перевищила 5%). На рис. 4 приведений графік розгону поїзда $V(t)$ при неоптимальному управлінні (крива 1), при оптимальному управлінні, отриманому в процесі моделювання при східчастій зміні резистора R_{Π} (крива 3), при розрахунковому оптимальному управлінні, отриманому при безперервній зміні пускового резистора (крива 2).

Значення витрат енергії при розрахунковій оптимальній траєкторії – 5910,070 кВт·с, при неоптимальному процесі розгону – 6062,854 кВт·с, оптимальному процесі розгону електропоїзда, але при східчастій зміні пускового резистора R_{Π} – 5997,981 кВт·с.

Висновки

Розроблено математичну модель для вирішення задачі синтезу оптимальних керувань пусковим резистором R_{Π} при розгоні електропоїзда за допомогою принципу максимуму Понтрягіна і дужок Пуассона.

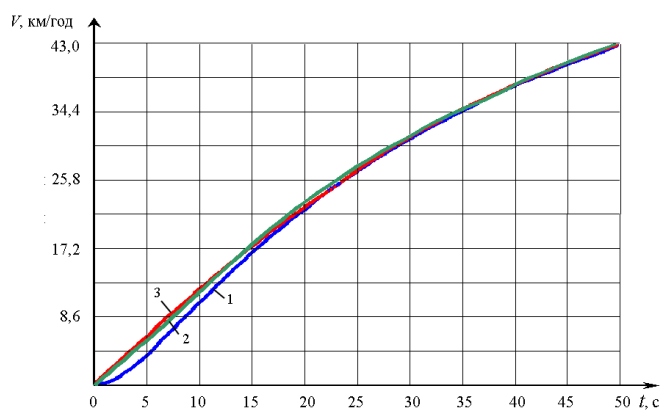


Рис. 4. Графік $V(t)$ розгону поїзда

Її дослідження при різних режимах розгону електропоїзда показали задовільну точність моделювання цих процесів. За допомогою розробленої моделі синтезована структура регулятора, який забезпечує оптимальний розгін електропоїзда з істотною економією енергоресурсів. Оскільки приведені розрахунки не є трудомісткими, вони можуть здійснюватися за допомогою бортових обчислювальних пристроїв, які будуть видавати машиністу необхідні рекомендації щодо режиму ведення поїзда.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 388 с.
2. Басов Г. Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу. Ч. 1. / Г. Г. Басов, С. І. Ясько. – Харків : Аспект, 2005. – 248 с.
3. Логвінова Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, О. М. Полях. – Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 110–113.
4. Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів / Д. М. Кислий. – Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2016, № 1 (61). – С. 71 – 84.
5. Притула М. Г. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів / М. Г. Притула, О.А Пасечник. – Вісник ДНТУ ЗТ, 2018, № 6 (78). С. 82 – 100.
6. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заповольский, С.Ю. Леонов // Научное издание – Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
7. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С.Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
8. Дмитриенко В.Д. Синтез законов управления подвижным составом на основе применения принципа максимума Понтрягина / В.Д. Дмитриенко, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко // Проблемы інформатики та моделювання. Тезиси XVII міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – С. 31.
9. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В. Д. Дмитриенко, А. Ю. Заковоротный. – Харьков: Изд. центр «НТМТ», 2013. – 248 с.

Received (Надійшла) 23.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.07.2022

OPTIMIZATION OF TRACTION DRIVE OPERATING MODES

Valentin Noskov, Volodymyr Skorodielov, Hennadii Heiko, Oksana Lipchanska

Abstract. In the existing traction drive control system, mainly proportional, proportional-integral and proportional-integral-differential regulators are used, which have universality and reliable operation. However, they do not provide high quality regulation and are inferior to microprocessor systems of optimal control. The issue of controlling the traction electric drive of an electric train is considered. It allows minimizing the energy consumption of the train when moving from a place and acceleration. The problem of starting resistor optimal control synthesis is solved using the Pontryagin maximum principle and Poisson brackets. For this, the developed mathematical model of the traction electric drive was used. The conducted studies at different acceleration modes of the electric train showed satisfactory accuracy of modeling of these processes. The structure of the regulator is obtained, which provides optimal acceleration of the electric train with a significant saving of energy resources. Since these calculations are not time-consuming, they can be carried out by an on-board computer, which will issue recommendations to the driver about the mode of train movement.

Keywords: traction electric drive, maximum principle, starting resistor.

Г. Л. Баранов¹, О. С. Комісаренко¹, В. І. Кравчук², М. В. Іванюта²

¹ Національний транспортний університет, Київ, Україна

² Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, Київ, Україна

ПРОБЛЕМИ АГРОТЕХНОЛОГІЧНОГО ЕЛЕКТРОННОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВРОЖАЇВ РОСЛИННИЦТВА

Анотація. В роботі досліджено принципи побудови роботів з штучним інтелектом для мобільного потокового виконання агротехнологічних технологій за всіма критеріями сучасних знань агротехнології та біології природних ресурсів, необхідних для отримання прибуткових врожаїв продукції рослинництва у зонах підвищеного ризику впливів незалежного природного середовища. Наведено вимоги до сучасних форм цифровізації агротехнологічних електронних карт, що точно відображають багаторівневі гетерогенні фактори прогнозних впливів зовнішнього середовища та відповідних адекватних дій робота. Формалізовано описи даних для боргових інформаційно-керуючих комплексів безпосередньо на гонах конкретного сільськогосподарського поля за почерговими регламентованими процедурами керованого землеробства. Доведено ефективність наскрізної інтелектуалізації від початку до механізованого й автоматизованого збору врожаїв з постачанням у контейнерах до споживачів товарної продукції. Визначено актуальність та перспективність застосування запропонованих принципів накопичення практичних знань у вигляді тематичних атласів з апробованими реальними цифровими картами конкретних полів. Запропоновано згрупувати дані, що відображають поняття синергетичних та симбіозних властивостей, а також фактичну родючість ґрунту у нестационарних областях ризикованого землеробства біоценозу у біосфері.

Ключові слова: робастий робот, штучний інтелект, проблемні знання, цифрові карти, прибуткові врожаї.

Вступ

Балансування між вимогами суспільства, для задоволення потреб реального споживання продуктів харчування, в умовах міжнародних проблеми безпеки життя зростаючого населення шляхом та наявними можливостями технологій керованого землеробства потребує достовірних фактів існування прибуткових врожаїв. Висока точність саме у запланований термін часу потрібна у областях загроз ризикованих нестационарних впливів різноманіття факторів незалежного природного середовища.

Україна, проголосивши підтримання курсу ООН на розв'язання проблеми керованого землеробства, зобов'язалась зробити прискорені реформи цифровізації інформаційно-телекомунікаційних технологій (ЦІТТ), що гостро потрібні різним галузям людської діяльності у сферах за визначеннями В.І. Вернадського спільної ноосфери.

Постановка задачі. В сучасних умовах загроз продовольчої безпеки оцифровані техніко-технологічні рішення (ТТР) повинні для ряду держав світу гарантувати потрібні обсяги врожаїв продукції рослинництва. Треба перетворити у цифрові зображення алгоритмів розв'язання актуальних проблем згідно знань провідних вчених, агрономів, менеджерів та інженерів. Відомі наявні технології за назвою точне (кероване) землеробство [1-3] лише частково сприяють впровадженню засобів систем навігації та управління рухом (СНУР) для штучних інтелектуальних систем з прогнозованими результатами отримання врожаїв.

Нова епоха вимагає мобільних роботів зі штучним інтелектом (AIR-Artificial Intelligence Robot).

Головна відмінність інноваційних AIR від рекламаних рухомих агрегатів систем точного (керованого) [4, 10] землеробства полягає у організації комп'ютерної пам'яті для максимізації знань, що вже апробовано, випробувано та рекомендовано [11] у вигляді стандартних регламентів. Головним пріоритетним напрямком раціонального розподілу дієвих функцій вирощування врожаїв є участь AIR.

Саме відсутність цифрових описів вже накопичених знань не дозволяє наявним технічним агрегатам чітко, точно ефективно, якісно та повноцінно виконувати лише інтеграційні функції енергетичної та симбіозної підтримки розвитку рослин за умов неперервного гетерогенного й різноманітного впливу незалежного природного середовища (НПС) цілісної ноосфери планети [10]. За зазначених причин наявний потенціал механізованої та автоматизованої спроможності виконавчих органів для землеробства не в повній мірі підвищує обсяги врожаїв. В той же час реально й фактично витрачаються значні кошти на ресурси держави (ПММ, насіння, добрива, тощо).

Таким чином майбутні інноваційні AIR повинні мати знання, що здатні гарантовано забезпечити функціонування складної динамічної системи (СДС) прибутковості та корисності зібраних (планових) врожаїв [10], за умов ретельного врахування фактичних витрат під час локального поточного ризику й невизначеності факторів впливу НПС.

Спільні людські (кадрові, правові, фінансові, агротехнологічні [5]) знання та активізовані спроможності AIR за допомогою ЦІТТ є важливим для вирішення проблем ефективного розподілу функцій з мінімалізацією витрат запасів і ресурсів за повний життєвий цикл сезонного вирощування щорічно

товарної продукції керованого землеробства [10-16]. Повномасштабна потокова взаємодія на принципах двоїності взаємовідношень НМІ (human machine interconnection) та АРІ (Application Programming Interface) також потрібна для одночасної паралельної роботи всіх ПЕВО. Тоді відбувається інтеграція, тому, що відомо кому разом але розподілено у просторі держави одночасно й майже синхронно (служба єдиного часу з метрологічною точністю), де, коли, як працювати з застосуванням [8, 9] спільного ресурсу Internet.

Аналіз літератури. У сучасних [1-16] іноземних і вітчизняних друкованих матеріалах на даний час відсутні монографії, енциклопедії та каталоги де узагальнено та систематизовано опис нормативної діяльності. Не формалізовано багатогранне формування та застосування агротехнологічних електронних карт, що гарантують за допомогою AIR отримувати очікувані обсяги врожаїв рослинництва. Тому логічною роботою є послідовне визначення термінів, понять та принципів цифровізації. Бітова інформація у двійковій системі числення на предикативному рівні спроможні довести істинність почергових дій AIR під час виконавчої роботи на реальному полі у поточних умовах прояву факторів НПС за нагальних потреб суспільства для регламентованого отримання прибуткового врожаю.

Основи ситуаційної обізнаності стосовно ефективного агротехнологічного керованого землеробства на загальних принципах системного балансування у межах складених динамічних систем та ПЕВО [10-11] складають природні процеси самовідновлення ресурсів живучості та стійкості при зовнішніх гетерогенних збуреннях. Точні знання факторів НПС забезпечують синтез гарантованого адаптивного управління [10], тому, що їх динаміка не є зараз, тут у наявних обставинах за енергетичними показниками руйнівних, форс-мажорних, катастрофічних [7] проявом критичних сил.

Звичайно такі загрозові явища НПС (потопи, зливи, землетруси, заморозки, буревії, а також хімічні, біологічні та соціальні негаразди) відбуваються, але частіше такі події обмежені локальними зонами за якими встановлено та є оповіщення на випадки їх наближення та прояву біодеградацій.

Прояв менш руйнівних факторів впливу НПС також заздалегідь проноормовано. Тому розробляються засоби прогнозування можливостей втрат врожаїв у таких випадках: з точним місцем і часом означених дій погоди та небажаних тенденцій; впливи які слід коригувати AIR; ресурсних витрат для відновлення властивостей природного самоevolюційного розвитку екоаграрного симбіозу у межах інтегрованого біому.

Фундаментальне значення математичних моделей еволюційного, синергетичного та симбіозного (одночасно з оточуючим навколишнім середовищем) розвитком рослини за почерговими прогнозованими станами, які можливо змінювати відповідно синтезованих за потреб агровиробництва засобів гарантовано-адаптивного управління (ГАУ), відмічав видатний академік України Л.В. Погорілий. Але

для спільної багатопланової роботи в даному напрямку потрібні значні міжнародні зусилля.

Зараз на засадах науково-технологічних досліджень й автономності накопичуються знання:

- Теоретично-стратегічного спрямування на біосферу з біотопів та біомів;
- Тактичного за видами конкретних біоценозів рослинних культур та зон їх вирощування;
- Оперативного й практичного опису досвіду біоінженерії керування біомасою за біотипами.

Біоінженерія вже реально визначає дії та процеси: хто, де, коли, навіщо; вимірює, фіксує, обробляє, описує, ідентифікує параметри за модельними структурами. Раціональні бітові описи визначають еволюційні переходи та можливі напрями розгалуження за реальними змінами й варіаціями навколо та разом з рослиною до стадії перетворення у біоресурс харчової чи споживчої промисловості. Саме зараз у означених множинних процедурах увага приділяється до ЦІТТ та відповідних методів математичного моделювання. Перспективні проекти вже почали дослідження у ізолюваних закритих, замкнених умовах штучних приміщень, наприклад, імітуючи перебування людини на планеті Марс [8].

Невирішені питання залишаються у сучасних ринкових умовах деградації біорізноманіття біогеонозу, глобальної конкуренції за природними ресурсами планети Земля. Незалежне НПС планети вимагає прискорення зі створенням AIR на математичних моделях з властивостями вказаними Л.В. Погорілим на самому початку ери PFS (Prosinging Farmer Systems) [1-3,10]. Відома система відношень вільна, не замкнена для безпосередньої праці на відкритому реальному ґрунті та наявних силових можливостях. Подолання невирішених проблем біоінженерії та цифровізації когнітивних карт гостро потрібне для AIR.

Мета роботи: Визначити принципи побудови агротехнічних електронних карт що за допомогою робастих роботів класу AIR здатні гарантувати отримання врожаїв за фактичними показниками стану родючості чи деградації ґрунту для даної цільової біоценозної культури й наявних засобів керованого землеробства відкритого для ризиків й прояву факторів реального середовища.

Виклад основного матеріалу

Етап бітової цифровізації оперативного практичного досвіду спрямовано на системні знання стосовно конкретної рослини та реального поля на повний життєвий цикл вирощування цільового врожаю. Первинні знання передбачають стандартизовані почергові звіти стосовно станів еволюції у СДС з системними складовими <ґрунт>, <рослина>, <середовище>. Спільними для усіх компонентів СДС є файл часових рядів (Clock). У цьому файлі фіксуються одночасні стани по декомпованим компонентам СДС з фіксацією календарних дат, часу вимірів, умов у поточному середовищі та полі, а також стосовно стану рослини.

Карта поля за потреб рослини та агротехнології її вирощування означає цифровізований символічний

опис конкретних просторово-часових парних, двоїстих понять. Взаємовідношення через змінні показники у межах вимірних з зазначеною точністю та розмірністю конкретного показника характеризують його реальні назви, сутності, особливості, специфіки [10]. Наприклад за прийнятою кваліфікацією: S_i – індикатор – визначальник у множині $I = i, n$ подібних i елементів; $P_{i,j}$ – характеристика i підмножини j властивостей $j = I, m$ за типовим зв'язком ij існування у життєвому циклі; R_{ijk} характеристика доцільних відносин між i та j за специфічними $k = i, l$, (синергетичними, симбіозними, біогеннокорисними) збігами обставин у конкретному просторово-часовому континуумі (ПЧК) [9, 10].

Для подальшого розуміння структур принципу SPR опису з детальними ijk індексами СОС розглянемо поняття S_x <хімічний склад родючого ґрунту>. Нехай у потрібному агроному описі S_x означає атом X_i за номером у хімічній таблиці елементів. Зараз маємо обмеження до Va^{56} за ознакою умовного першого радіоактивного елемента й так званих рідкоземельних елементів, що належать рядам лантаноїди та актиноїди. Звертаємо увагу, що опис зразу стає вдвічі меншим ніж знання певної періодичної системи хімічних елементів [12]. Кожен символ елемента X має: індивідуальний знак; верхній індекс означає атомний номер, далі є лінгвістична назва за стандартами мовних тлумачень, наприклад O^8 – кисень; за потреб поглиблення можливо знати атомну масу чисельно та структурований опис електронів на існуючих підрівнях; також розподіл електронів по кожному категорійному рівню. Даний принцип забезпечує можливість точно фіксувати конкретні типи існуючої молекули сполук за, наприклад, описом формул: H_2O – водень та кисень утворюють молекулу води; SiO_2 – молекули польового піску; F_2O_3 – оксид заліза. Всі органічні сполуки характеризують більший обсяг різноманіття у біосферах. Біомаса гумусу характеризується відповідними структурованими описами довгих молекул, наприклад: біополімери, ензими, білки, жири, вуглеводні та продукти життєдіяльності біогенезу у родючому ґрунті конкретного поля.

На подібних системних принципах потрібна обізнаність досягається у файлах поняття S^*F <фізичний стан кореневмісного об'єму ґрунту> на конкретному полі з координатами у географічній системі координат та відповідними картами й позначеннями нерухомих об'єктів [10, 11].

Звичайно значна більшість нерухомих об'єктів не цікавить конкретну рослину. Проте реальний фізичний та хімічний вплив від них треба знати у вигляді потоків: забруднення, запилення, отрут, теплового чи електромагнітного ураження. Фізична кваліфікація визначає категорії 5 станів: тверде тіло; рідина; гази; плазма; випромінювання. Лише 4 типи взаємодій визначають для взаємовідношень фізики явищ: гравітаційне у полях з масами; електромагнітне між зарядами з подальшими механічними проявами у просторі; сильне між адронами елементарними частками; слабке з квантовими проявами у просторі. Для практичних задач вирощування вро-

жаїв у зонах ризикованого землеробства досить описів перших двох типів.

Як матеріал, що деформується, змінюється під дією сило-моментних навантажень, кожен означений мікроелемент фізичного об'єму характеризують типовими відомими геометричними фігурами: сфера, тор, багатогранник чи багатокутник, циліндр, еліпсоїд, конус, призма, піраміда, куб тетраедр. Геометричні розміри ребер між вузлами позначають довжиною у відповідній мірі. Кути на площях поверхонь чи стереометричні кути вимірюють у градусах чи еквівалентах $180^\circ = 2\pi$, $\pi = 90^\circ$ з відповідним поділенням на 60 чи 360 часток за потреб точності кутової міри.

Метрологічні міри у різних масштабах взаємовідношень потрібні для: оцінювання типів деформацій у об'ємах реального ґрунту; визначення розподілів напружень та навантажень; оцінювання просторової кривизни за рахунок зсуву, кручення, згину, коливань під час взаємодії зовнішніх факторів НПС та внутрішніх фактів складових компонент ґрунту у спільному контакті взаємовідношень у ПЧК з означеними координатами для СНУР AIR [13-15].

Стан біогенезу, біоритмів родючості біомаси ґрунту поля залежить від реальних просторово-часових взаємодій за життєвий цикл еволюційного біоному ґрунту. Агроному потрібно знати що раніше відбувалось, відбувається зараз у наслідок дій AIR чи буде за прогнозами відбуватися. Фіксовані поняття динамічних перетворень та рухи дозволяють оцінювати реальні дії силових, гравітаційних, теплових, оптичних, променевих, електромагнітних, тобто гетерогенних явищ. Узагальнені фазові переходи завершуються змінами попередньої рівноваги на новий стан.

Поширені зміни агрегатного стану ґрунту найбільш характерні для води й розчинів в залежності від температур. Так, взимку (сніг, лід) при умовному нулі градусів Цельсію знання критичних та відповідних точок плавлення (сумішей) й випаровування обов'язкові. При підвищеннях температур чи їх суттєвих коливаннях влітку закономірно відбуваються інші коливальні та хвильові фізичні й біологічні процеси. Біотоп НПС впливає на біоценоз з життєвими організмами у межах кореневмісного шару ґрунту. Важливо знати інші біоритми на поверхнях рельєфного ґрунту та у повітрі, де роються мошки, комарі, мікроорганізми, птахи тощо. Біосфера деградує тому що відбувається екологічне забруднення промисловими викидами в атмосферу [3, 4].

Саме даний дуже стислий неповний опис характеристики взаємовідношень дозволяє стверджувати, що гостро стоять питання математичного, метричного, наукового цифрового (кодованого) опису простого поняття який є (когнітивна карта конкретного поля) для застосування її у пам'яті AIR. Головна СОС «Когнітивна карта», така що визначає максимально ефективні агротехнологічні операції на ґрунті поля, тому що за витрати ресурсів користувач продуктів рослинництва постійно сплачує ринкову ціну.

Втрата раціональної точності опису «Когнітивної карти» для AIR неможлива, інакше можливі не-ефективні, несвоєчасні процеси деградації біоцено-

зу. Активізація руйнівних природних дій з причин відсутності повного контролю похибок (наявності регламентованої та відображеної у карті дозволеної невизначеності може призвести й до банкрутства.

Розглянемо поки ще одне поняття «щільність ґрунту» як показник наступних дій AIR на полі. Фізичне визначення щільності можна описати залежністю:

$$\rho = \frac{m}{V} = \lim_{\Delta V} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}; [кг/м^3], \quad (1)$$

де $m = \int_V \rho dV = \int_V \rho(x, y, z) dx dy dz$ – маса речовини та її метричний об'єм родючої частки.

За цим виразом можливо отримати пробні виміри у окремих фіксованих реперних точках поля з реально значними тривалими гонами.

Доцільність проби обґрунтовує опис мати якісь еталонні значення ρ з метою подальших актуальних порівнянь $\rho - \Delta\rho < \rho < \rho + \Delta\rho$, де лише відчуття модуля міри $|\Delta\rho|$ похибки при знанні еталонної ρ_0 щільності дозволяє лише підтвердити стан чи є ущільнення, чи є зменшення щільності у іншій точці простору.

Біоінженерія біоритмів для потрібних дій БІКК у біоценозі конкретного поля відсутня [1-5, 12-16], але без цих знань не буде ефективність черги дій запропонованого AIR.

Розглянемо ґрунт як деформоване тіло що має запас потенціальної енергії й тому може виконувати певну біоценозну роботу. На полі кожна частка (мікрооб'єму біомаси) знаходиться в стані умовної рівноваги.

Дійсно зовнішні реальні (але ще не вимірні) сили впливу НПС протилежні внутрішнім силам пружності (власна властивість ґрунтових часток). Протилежні внутрішнім окремі нанорозмірні події на полі не мають масштабних проявів й тому кінетична енергія ґрунту на полі не змінюється. Саме за цих законів фізики квазістаціонарних процесів еволюційний природний стан можливо характеризувати точно значеннями пружної енергії що може бути описана залежністю:

$$u = \frac{1}{2} F \Delta l = \frac{1}{2} K (\Delta l)^2; \quad (2)$$

де K – коефіцієнт пружності при вимірах зміни розміру умовного стержня з відомою формою тіла.

Переходимо до визначення щільності за означеними умовами:

$$\rho^* = \frac{u}{V} = \frac{1}{2} \frac{F \Delta l}{\Delta l^3} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2} E \varepsilon^2 = \frac{\varepsilon^2}{2E}; \quad (3)$$

де об'єм $V = S \Delta l = \Delta l^3$ для умовного кубічного тіла, $\sigma = K \varepsilon$ – напруження при $\varepsilon = \Delta l / l_0$ значенні відносною деформації, E – модуль Юнга. Слід наголосити що у відомих довідниках вже накопичені таблиці з описами цих речовин та значеннями не лише модуля Юнга E , а також коефіцієнту Пуассона μ та модуля зсуву G :

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (4)$$

Між розрахунковими чисельними параметрами відома алгебраїчна взаємозалежність що дозволяє визначити щільність пружної енергії при зсувах згідно відношень:

$$\rho^* = \frac{u}{V} = \frac{1+\mu}{E} \tau^2 = \frac{\tau^2}{2G}, \quad (5)$$

де τ – дотичне напруження у напрямку дії сили що обумовлює кут γ зсуву.

Аналіз концептуального моделювання поняття «щільність ґрунту» конкретного поля для агротехнологічних впливів на його поточний стан за допомогою наявних виконавчих органів AIR надає переваги знанням за формулами (3), (4), (5). Такі знання орієнтовані на конструктивну системну динаміку одночасної зміни лінійних значень l в площинах S та об'ємних сферах V властивостей конкретного ґрунту за фазами органогенезу.

Електронна карта та інваріантні властивості символічних понять з алгоритмічними можливостями переходу до різних систем опису парних, двоїсних взаємовідношень, включаючи оперативний синтез закону скорегованого ГАУ, найбільш раціонально доцільні для вирощування біоенергетичних культур.

Запропоновані форми символічного балансування на рівні кодових бінарних описів – понять керованого біоенергетичного розвитку цільової рослини гарантує точність. Знання існування почергових кінематичних рухів робочих органів AIR під час реалізації за допомогою АТЕК дозволяють оперативно синтезувати відповідні раціональні процеси – реагування СДС ПЕВО на поточні впливи зовнішнього НПС. В той же час паралельно, вже без витрат запасу й ресурсів ПЕВО, активізуються, запускаються, прискорюються природні квазістаціонарні й біоценозні процеси на даному полі. Таким чином паралельно використовують біоритми у біомасах, які забезпечують самоорганізацію й самовідновлення біогенезу (компенсують виявлену біоекологічну деградацію) у кореневмісних заглиблених шарах контрольованої щільності $\rho(t, x, y, z, \theta, u, V, \theta, \varepsilon)$ ґрунту. Синергетичні ефекти та покращення умов для керованого розвитку цільової рослини формуються спільно з симбіозом наявних у біоті корисних біосферних агентів з множини допоміжників відновлення потенціальної маси родючого поля.

Висновки

Символьно почергова бінаризація знань, понять та законів гарантовано-адаптивного управління роботами підвищує рівні обізнаності відповідальних осіб ПЕВО.

Символьна цифровізація інформаційно-телекомунікаційних технологій та засобів Інтернет гарантує надання роботам з штучним інтелектом оперативні найбільш раціональні агротехнологічні електронні карти. Можливі оцінки станів для планового отримання врожаїв рослинництва.

Агротехнологічна ситуаційна обізнаність у зонах біоенергетичної динаміки взаємовідношень у системі <ґрунт> - <рослина> - <середовище> на базі накопичуваного практичного досвіду забезпечує раціональний розподіл функцій між ресурсами робіт та ґрунту з біоенергетичними ресурсами кореневмісного об'єму, де паралельно й одночасно можуть відбуватись природні процеси самоорганізації та самовідновлення родючості в наявних фактах конт-

рольованої деградації під впливом зовнішнього середовища. Кінцевими на основі логічних бітів цифровізації агротехнологічних та біоенергетичних знань результатами дослідження є символічні поняття умов біоценозу конкретних культур для отримання ефектів:

1) у сферах обчислювальної складності NP задач зменшення витрат на застосування значного різноманіття тлумачень й лінгвістичних Big Data описів процесів у складних динамічних системах;

2) у сферах навчання, тренажу та числового моделювання за потреб доказу ефективності синтезу техніко-технологічних рішень символізованого підвищення системного повного уявлення користі практичних взаємовідношень та інтегрованих втрат;

3) у сферах формування конкурентних когнітивних карт завдань для роботів зі штучним інтелектом для напрацювання за регламентованими процедурами лише раціональних розподілів функцій з отриманням продуктів рослин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Adamchuk V.I. Characterizing Soil Variability Using On-the-Go Sensing Technology The Site-Specific Management Guidelines (SSMG), 2006- 4p.
2. Аніскевич Л.В. Адамчук В.І. Технології точного землеробства// Науковий вісник НАУ. 2006, Вип. 101. С. 8-27.
3. Системи точного землеробства: підручник / Л.В. Аніскевич, Д.Г. Войтюк, Ф.М. Захарін, С.О. Пономаренко: за ред. Л.В. Аніскевича – Київ: НУБіП України, 2018 – 566 с.
4. Сисолін П.В. Повість конструктора про стан вітчизняного сільськогоспмашинобудування для рільництва - Кіровоград: «Код», 2010 – 52 с.
5. Dixon K. Satellite Position Systems // Efficiencies, Performance and Trends. European Journal of Navigation. – 2005. – Vol 3. №3 P 58-63.
6. Ecorprobe 5. Operator's manual. – RS Dynamics, 2005. 80 p.
7. Балансування навантаження у розподілених системах. Електронний ресурс. Режим доступу <http://intuit4.intuit.ru/studies/courses/П46/Lecture/3287?page=1>.
8. Load Balancing in Paralell Computers. Електронний ресурс. Режим доступу <http://www.inspirenignite.com/load-balancing-in-parallel-computers>.
9. Кравчук В.І., Баранов Г.Л., Комісаренко О.М. Інформаційна технологія прогнозування та випробування майбутньої аграрної техніки. «Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України» збірник наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке, 2018. – Вип. 22 (36). С27-35. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2018-1-22\(36\)-25-33](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2018-1-22(36)-25-33).
10. Баранов Г.Л., Баранов В.Л., Близнюк В.Н. Гарантовано-адаптивная модель процессов управления подвижными объектами. Сучасні технології в аерокосмічному комплексі. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції ЖІ-ТІ. Житомир, 1999, с. 143-144.
11. Yue, Guang & Pan, Yutian. (2020). Intelligent control system of agricultural unmanned tractor tillage trajectory. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. DOI 38. 1-11. 10.3233/JIFS-179818.
12. Z. en. Philosophical, Logical and Scientific Perspectives in Engineering, Intelligent Systems Reference Library 143, Springer International Publishing Switzerland 2014. DOI 10.1007/978-3-319-01742-6 1.
13. Eli-Chukwu, Ngozi & Ogwugwam, Ezeagwu. (2019). Applications of Artificial Intelligence in Agriculture: A Review. Engineering, Technology and Applied Science Research. 9. 4377-4383. DOI 10.48084/etasr.2756.
14. Durgude, Shubham & Ram, Shri. (2020). ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SOIL SCIENCE. DOI 10.13140/RG.2.2.35503.76962.
15. M. Hossein, A. Sohani, M. Zabihigivi, U. Wagner, T. Koch, H. Sayyaadi, Machine learning and artificial intelligence application in land pollution research In Intelligent Data-Centric Systems, Current Trends and Advances in Computer-Aided Intelligent Environmental Data Engineering, Academic Press, 2022, P. 273-296, ISBN 9780323855976, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85597-6.00008-2>.
16. Кравчук В. Таргоня В. Гайдай Т. Голуб Г. Кухарець С. Іванюта М. Методологія і модель еколого-економічного управління агротехнологіями. «Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України» збірник наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке, 2020. – Вип. 27 (41). С142-152. DOI 10.31473/2305-5987-2020-2-27(41)-13.

Received (Надійшла) 30.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.05.2022

Problems of agrotechnological electronic mapping for obtaining plant crops

George Baranov, Olena Komisarenko, Vladimir Kravchuk, Mykhailo Ivanyuta

Abstract. The principles of construction of robots with artificial intelligence for mobile streaming of agrotechnological technologies according to all criteria of modern knowledge of agrotechnology and biology of natural resources necessary to obtain profitable yields of crop products in areas of increased risk of independent natural environment. The requirements to modern forms of digitization of agro-technological electronic maps are given, which accurately reflect the multilevel heterogeneous factors of forecast environmental influences and the corresponding adequate actions of the robot. Data descriptions for on-board information and control complexes directly on the races of a specific agricultural field according to alternate regulated procedures of managed agriculture are formalized. The efficiency of end-to-end intellectualization from the beginning to mechanized and automated harvesting with delivery in containers to consumers of marketable products is proved. The relevance and prospects of application of the proposed principles of accumulation of practical knowledge in the form of thematic atlases with tested real digital maps of specific fields, reflecting the synergetic and symbiotic properties of the concept. Actual soil fertility in non-stationary areas of risky agriculture.

Keywords: robust robot, artificial intelligence, problem knowledge, digital maps, profitable harvests.

Л. Н. Беркман¹, О. В. Барабаш², О. М. Ткаченко¹, А. П. Мусієнко², О. А. Лаптев³, О. В. Свинчук²

¹ Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Анотація. У статті досліджено концептуальну модель інтелектуальної мережі, яку пропонується використовувати при синтезі мережі передачі керуючої інформації в інтелектуальних системах управління інфокомунікаційними мережами. При цьому користувач цифрового майбутнього повинен мати можливість не тільки отримувати різноманітні послуги високої якості, але і створювати необхідні послуги. Показано, що під час синтезу інтелектуальних систем управління необхідно враховувати такі особливості: швидкість обробки на верхніх рівнях концептуальної моделі зменшується з ростом «інтелектуальності», яка, в свою чергу, зменшується в міру просування вниз по транспортному рівню запропонованої моделі. Запропоновано принципи побудови та архітектура інтелектуальних систем управління з урахуванням поточних показань вимірювально-інформаційних засобів. Запропоновано модель обслуговування вимоги, в якій застосовано використання визначників керуючого впливу і централізованої логіки. Це дозволяє прискорити і спростити процес введення нових і корекції існуючих керуючих впливів, що позначається на економічності всієї мережі. Модель розділяє аспекти, які стосуються послуг, і аспекти, пов'язані з мережею. Це дозволяє описувати послуги та можливості інтелектуальних систем управління незалежно від базової мережі, над якою створюється інтелектуальна надбудова. Показано, що одним з ефективних способів підвищення використання ресурсів мережі в надзвичайних умовах є динамічний розподіл потоків інформації. Для забезпечення динамічного розподілу потоків в мережі передачі керуючої інформації пропонується використовувати систему динамічного управління розподілом потоків, яка є підсистемою інтелектуальної системи управління. Проаналізовано залежності ймовірності вибору обхідного шляху від коефіцієнта використання каналів. Проаналізовано середній час затримки повідомлення в мережі. Показано, що динамічна маршрутизація ефективна тільки при середньому використанні каналів. Проведено порівняння динамічного і статичного розподілу потоків пакетів для рівномірного розподілу навантаження по абсолютно надійній мережі. При перекосах навантаження та / або виникненні будь-яких пошкоджень на мережі, динамічний розподіл потоків пакетів приводить до істотно більшого ефекту.

Ключові слова: мережа, інтелектуалізація, система управління, синтез, модель, вимога, вплив, розподіл, потік.

Вступ та постановка задачі

Управління сучасними інфокомунікаційними мережами має бути незалежним від послуг, які надаються споживачеві. Для взаємодії розподілених компонентів управління в єдиній системі, а також для реалізації функцій управління, необхідна мережа, якій передається інформація управління.

Розвиток концепції інтелектуальних систем управління (ІСУ) зумовлює низку важливих питань. Одне з них пов'язане з формою подання інформації в організацію механізмів управління. При цьому важливим аспектом є аналіз можливостей та особливостей застосування тих чи інших інформаційних технологій для обробки інформації у задачах інтелектуального управління. Для параметричного й структурного налаштування управляючих алгоритмів, модифікації програми для досягнення цілей управління, а при необхідності і їх корекції з урахуванням поточних показань вимірювально-інформаційних засобів, пропонуються принципи побудови ІСУ.

Необхідність ефективного виявлення аварійних ситуацій, забезпечення суттєвих можливостей з аналізу та розпізнавання величини відхилення параметрів об'єктів управління від норми, зумовлюють застосування ієрархічної організації ІСУ. Формування стратегії цільової поведінки, планування послідовності дій, синтезу виконавчих законів, що задовольняють заданим показникам якості між рівнями мережі. При

цьому забезпечується вибір унікальної сукупності власних моделей подання інформації, механізмів їх обробки, засобів інформаційної підтримки та очікування об'єктів керування.

Головним критерієм вибору має бути необхідна якість функціонування систем управління в умовах невизначеності при випадковому характері зовнішніх збурень, до яких можна віднести непередбачувану зміну цілей, власних експлуатаційних характеристик, параметрів середовища тощо.

Аналіз останніх досліджень. Останніми роками розробникам дедалі частіше доводиться вирішувати завдання проектування систем управління об'єктами досить складної природи [1–5]. Об'єкти, для яких виникає потреба в розробці нової концепції побудови систем управління, називаються «великими системами». На жаль, немає чіткого визначення великих систем, яке влаштувало б усіх фахівців. Досить часто у літературі можна зустріти ті характерні особливості, які дозволяють дотримуватися традиційних методів, що розвиваються в теорії ідентифікації. Підтвердженням цього є статті [6–7].

У роботі [8] розглянуто основні методи теорії оптимального управління: динамічне програмування, принцип мінімуму Понтрягіна, чисельні методи оптимізації. Дані методи є основою побудови систем управління. Проте, у роботі не показано можливість застосування розглянутих методів для побудови інтелектуальних систем управління.

У роботі [9] представлено порівняльну характеристику інформаційних структур у завданнях групового рішення та їх вплив на гнучкість групової оптимізації. Це є важливим питанням на етапі синтезу складних технічних систем. При цьому в роботі не висвітлені результати дослідження для надзвичайних ситуацій.

У статті [10] сформувався термін «інтелектуальна система», що наголошує на основній відмінності таких систем – можливості системної обробки інформації. Однак питання автономності, адаптивності та надійності систем управління за наявності різного роду невизначеностей розкриті не повністю.

У статті [11] представлені особливості синтезу системи управління мережею зв'язку другого рівня TMN з комбінованим принципом управління, детально розглянуті принципи управління з обурення та відхилення. При цьому результатів дослідження для випадку інтелектуальних систем не висвітлено.

У статті [12] показано, що мережеві системи управління – це просторово розподілені системи, де зв'язок між контролерами і виконавчими пристроями підтримується загальною мережею зв'язку. Однак питання вибору основних показників якості каналу управління розкрито не повністю.

Стаття [13] присвячена дослідженню архітектури інтелектуальної мережі, розробці методик розрахунку основних параметрів мережі, взаємозв'язків між ними та векторного синтезу мережі. Проте не показано, які саме методи векторного синтезу доцільно застосовувати при оптимізації інтелектуальної мережі.

Автори статті [14] демонструють новий технологічний підхід для архітектури мереж Інтернету речей. Він передбачає багаторівневу реалізацію з використанням хмарних серверів, оптимізовану потокову передачу даних та завантаження. Це дозволить значно скоротити час передачі, витрати та обсяги пам'яті основного сервера хмар.

У статті [15] запропоновано алгоритм оптимального прийому з використанням когерентного методу прийому, який доцільно використовувати в каналах управління інфокомунікаційних мереж. При цьому результатів досліджень для випадку інтелектуальних мереж не висвітлено.

Автор статті [16] досліджує напрями розвитку інфокомунікацій як розширення телекомунікацій з обробкою інформації та контенту функції управління. Інформаційні та комунікаційні технології вважаються розширеним синонімом для інформаційних технологій, щоб наголосити на інтеграції телекомунікацій. Проте питання управління інфокомунікаційними мережами розкрито не повністю.

У статті [17] досліджуються основні тези теорії автоматичного управління. Наведено етапи її формування як науки. Розглянуто термінологію та концептуальні ідеї будівництва замкнутих систем, а також теорії збурень, стійкості та синтезу систем, які самостійно налаштовуються, як частини загальної теорії автоматичного управління. Проте, питання синтезу та управління інтелектуальних систем у роботі не розглядаються.

У статті [18] досліджуються технології побудови мобільних мереж 5G, які мають забезпечити умови створення ультраціільних мереж для отримання високоякісних послуг. Розроблено метод оптимізації параметрів сигналу за рівномірним критерієм, що може бути використаний для побудови інтелектуальної системи управління інфокомунікаційною мережею.

За проведеним аналізом можна зробити висновок, що при дослідженні, аналізі та синтезі інфокомунікаційних мереж ефективним є апарат складних систем. Створення систем, апіорно орієнтованих для роботи в умовах неповноти або нечіткості вихідної інформації, невизначеності зовнішніх збурень та середовища функціонування, потребує залучення нетрадиційних підходів до управління із застосуванням методів та технологій штучного інтелекту. Такі системи називаються інтелектуальними системами управління та фактично створюють новий клас, для якого принципи побудови, методи аналізу та синтезу повинні враховувати всі характерні риси різноманітних телекомунікаційних мереж зв'язку майбутнього.

Метою роботи є розробка концепції побудови інтелектуальних систем управління для забезпечення ефективного, гнучкого та надійного функціонування інфокомунікаційних мереж. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- формалізація задачі синтезу мережі передачі керуючої інформації за концептуальною моделлю інтелектуальної мережі;
- побудова та дослідження моделі обслуговування вимоги в інтелектуальній системі управління;
- застосування динамічного розподілу потоків інформації в інтелектуальній системі управління.

Виклад основного матеріалу

Проблема управління інфокомунікаційними мережами є однією з найважливіших у практиці експлуатації мереж. До сучасної системи управління інфокомунікаційної мережі пред'являються нові вимоги. Користувач цифрового майбутнього повинен мати можливість не лише отримувати різноманітні послуги високої якості, а й створювати необхідні послуги. Для надання цієї можливості необхідно здійснити синтез інтелектуальної системи керування.

Концептуальна модель інтелектуальної мережі. Основною властивістю ІСУ є те, що мережа передачі керуючої інформації побудована за концептуальною моделлю інтелектуальної мережі (рис. 1).



Рис. 1. Концептуальна модель інтелектуальної мережі

Для даної моделі швидкість обробки зменшується із зростанням «інтелектуальності», яка, у свою чергу, зменшується в міру просування вниз транспортним рівнем запропонованої моделі. Цим обумовлені проблеми, які потребують оптимального вирішення під час використання концепції інтелектуальної мережі.

Таким чином, враховуючи сучасні вимоги, пропонується будувати системи управління інфокомунікаційними мережами із застосуванням методів і технологій інтелектуальних мереж, для яких мережа передачі керуючої інформації побудована за концептуальною моделлю. При такому підході до синтезу мережі передачі керуючої інформації швидкість обробки на верхніх рівнях зменшується зі зростанням «інтелектуальності».

Модель обслуговування вимоги в інтелектуальній системі управління. Модель обслуговування вимоги в ІСУ передбачає створення визначників керуючого впливу – це додаткові програмні та/або апаратні засоби, що полегшують подальше розширення функцій та внесення змін до будь-якої системи (рис. 2). Дана модель включає три основні компоненти:

- блок опрацювання основних вимог;
- визначник керуючого впливу, який розпізнає заявки, що надсилаються до ІСУ, та тимчасово призупиняють процес обслуговування вимоги на період обміну інформацією з логічним блоком управління ІСУ;
- логічний блок управління ІСУ, що містить апаратні засоби та програмне забезпечення, які призначені для створення додаткових керуючих впливів та передачі інформації, що керує стандартними процесами обробки вимог.



Рис. 2. Модель обслуговування вимоги в ІСУ

Такий поділ функцій обслуговування вимог в інтелектуальній системі має низку переваг. Для виконання функцій визначника керуючого впливу потрібна лише невелика корекція існуючих комутаційних систем, що реалізується відповідним програмним забезпеченням. Центральний логічний блок управління дозволяє прискорити та спростити процес введення нових та корекції існуючих керуючих впливів, що позначається на економічності всієї мережі.

Концептуальна модель ІСУ розділяє команди керування та аспекти, пов'язані з мережею, що дозволяє описувати можливості інтелектуальної мережі незалежно від базової мережі, над якою створюється

інтелектуальна надбудова. Дана модель розглядається як структура із трьох рівнів (рис. 3):

- рівень команд управління;
- рівень функціонування – визначає можливості мережі, які необхідні застосування послуг, та визначає функції, реалізовані вузлами мережі. Мережа розглядається як єдине ціле, даються моделі обробки вимоги та незалежних від команд управління конструктивних блоків;
- фізичний рівень – визначає вузли мережі, їхні функціональні елементи та протоколи взаємодії. На цьому рівні визначаються фізичні елементи, способи відображення функціональних елементів на фізичні та описуються способи реалізації мережевих елементів інтелектуальної мережі.

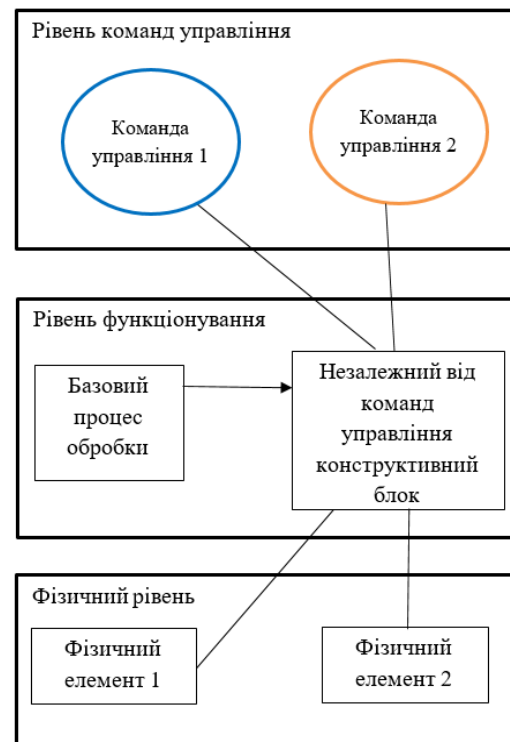


Рис. 3. Концептуальна модель ІСУ

Незалежні від команд управління блоки забезпечують виконання стандартних функцій, що використовуються багаторазово. Базовий процес обробки вимоги здійснюється спеціалізованим блоком, який взаємодіє з іншими блоками, у вигляді точок ініціалізації та завершення. Основними вимогами до структури інтелектуальної мережі є:

- мережеві функції виконуються у вузлах інтелектуальної мережі;
- вузол може виконувати одну або кілька функцій;
- виконання загальної мережевої функції не може здійснюватися кількома вузлами одночасно;
- два різні вузли можуть виконувати однакові мережеві функції;
- вузли повинні мати стандартні інтерфейси;
- розподіл мережевих функцій на вузлах і стандартні інтерфейси не повинні залежати від мережі.

Таким чином, запропоновано модель обслуговування вимоги до ІСУ, яка передбачає введення визначників керуючого впливу та централізованої логіки,

дозволяє прискорити та спростити процес введення нових та корекції існуючих керуючих впливів. Це дає змогу підвищити економічність усієї мережі.

Динамічне розподілення потоків інформації в ІСУ. Одним із ефективних способів підвищення використання ресурсів мережі в надзвичайних умовах є динамічний розподіл потоків інформації [19]. Для забезпечення динамічного розподілу потоків мережі передачі керуючої інформації пропонується використовувати систему динамічного управління розподілом потоків, яка є підсистемою ІСУ. Передача пакетів при динамічному управлінні потоків пакетів забезпечується не тільки по прямому шляху, але й по будь-якому з обхідних шляхів, що є в залежності від ситуації в мережі [18].

Ймовірність зайнятості ресурсів цього шляху обумовлена ймовірністю зайнятості ресурсів пам'яті вузлів мережі, через які проходить цей шлях, і ймовірністю зайнятості віртуальних каналів, яка характеризується коефіцієнтом використання ρ , де $0 \leq \rho \leq 1$. При рівномірному навантаженні по всій мережі ймовірність наявності зайнятого основного, але вільного одного обхідного шляху, тобто можливість вибору обхідного шляху передачі пакетів можна обчислити так: $P \approx \rho(1 - \rho)$. Ймовірність вибору $N - 1$ обхідних шляхів становить $P \approx \rho(1 - \rho^{N-1})$.

На рис. 4 наведені графіки залежності ймовірності вибору обхідного шляху P від коефіцієнта використання каналів за наявності двох, трьох і чотирьох допустимих шляхів передачі інформації.

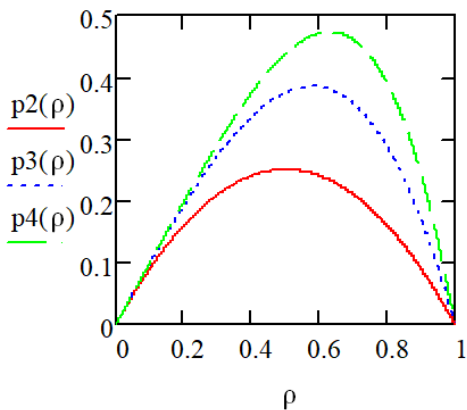


Рис. 4. Графіки залежності ймовірності вибору обхідного шляху від коефіцієнта використання каналів при наявності двох, трьох і чотирьох допустимих шляхів передачі пакетів

Ймовірність вибору одного з $N - 1$ обхідних шляхів є невеликою як при малих, так і при великих значеннях ρ , оскільки обхідний шлях зазвичай є довшим шляхом, то і вибір його передачі призводить до підвищення загального коефіцієнта використання каналів.

Нехай коефіцієнт використання рівномірно збільшується по мережі на величину α , тоді

$$P \approx \rho(1 + \alpha) \left(1 - [\rho(1 + \alpha)]^{N-1} \right). \quad (1)$$

Слід зазначити, що ця залежність виконується при $\rho < 1/(1 + \alpha)$.

На рис. 5 представлені графіки залежності P від ρ при використанні обхідних шляхів для $\alpha = 20\%$.

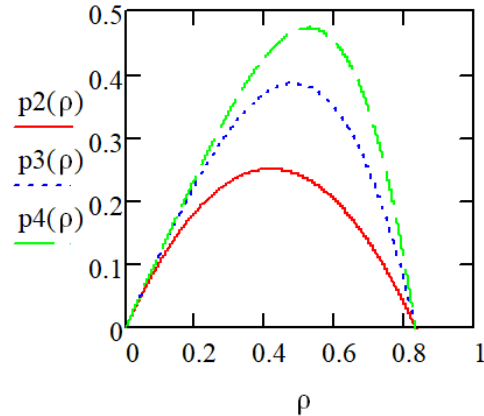


Рис. 5. Графіки залежності ймовірності вибору одного з обхідних шляхів від коефіцієнта використання ρ для $\alpha = 20\%$

Таким чином, одним із ефективних способів підвищення використання ресурсів мережі у надзвичайних умовах є динамічний розподіл потоків інформації. Для забезпечення динамічного розподілу потоків у мережі передачі керуючої інформації пропонується використовувати систему динамічного управління розподілом потоків, яка є підсистемою ІСУ. Для підтвердження ефективності динамічної маршрутизації проведено дослідження залежності ймовірності вибору обхідних маршрутів передачі від коефіцієнта використання каналів. Показано, що динамічна маршрутизація ефективна лише за середнього використання каналів.

Результати досліджень середнього часу затримки в мережі передачі керуючої інформації. Середній час затримки повідомлення в мережі, включаючи час очікування на передачу каналами, при статичному розподілі шляхів передачі пакетів розраховується за формулою:

$$\tau_{cm} = \frac{HL}{1 - \rho}, \quad (2)$$

де H – середня кількість транзитних ділянок у вибраному шляху передачі.

Розрахунок величини (2) передбачає такі обмеження: пуассонівські потоки повідомлень у мережі, експоненційний розподіл довжин повідомлень із середнім числом пакетів L та нормалізований одиничний час передачі пакета каналом. При динамічному розподілі потоків пакетів можливі два варіанти: або пакети одного повідомлення очікують звільнення каналу по обраному шляху для даного повідомлення (мережа віртуальних каналів), або передаються по кожному з обхідних шляхів (дейтаграмний режим).

Для першого випадку:

$$\tau_{d1} = \frac{HL}{1 - \rho(1 + \alpha)}, \quad (3)$$

де $(1 + \alpha)$ враховує той факт, що частина навантаження при динамічному управлінні розподілом потоків пакетів буде передана більш довгими шляхами.

У другому випадку, для умови відсутності очікування передачі каналами, час затримки повідомлення в мережі складається з часу, необхідного для передачі L пакетів з першого (вихідного) вузла, і часу передачі кожного пакета з $(H(1 + \alpha) - 1)$ інших (транзитних) вузлів. Вважаючи, що час, який витрачається на передачу одного пакета, дорівнює одиниці, то загальний час, необхідний передачі з вихідного вузла L пакетів, дорівнює L одиниць.

Оскільки при дейтаграмному режимі всі пакети одного повідомлення передаються по мережі паралельно різними шляхами, можна прийняти, що час передачі всіх пакетів через транзитні вузли мережі чисельно дорівнює часу передачі мережею одного пакета. Таким чином, при дейтаграмному режимі час передачі пакетів через транзитні вузли займає $(H(1 + \alpha) - 1)$ одиниць часу. Таким чином,

$$\tau_{02} = L + H(1 + \alpha) - 1. \quad (4)$$

Враховуючи вираз (2) для основного шляху та вираз (4) для обхідних шляхів, знаходимо сумарний середній час затримки повідомлень у мережі при динамічному розподілі потоків пакетів:

$$\tau_{\partial} = \frac{(1 - P)H}{1 - \rho} + P(L - 1 + H(1 + \alpha)). \quad (5)$$

На рис. 6 зображено графіки залежності середнього часу затримки в мережі від коефіцієнта використання каналів для статистичного (постійних маршрутів) та динамічного (динамічної маршрутизації) розподілів пакетів при $\alpha = 20\%$ та наявності двох і чотирьох допустимих шляхів передачі пакетів.

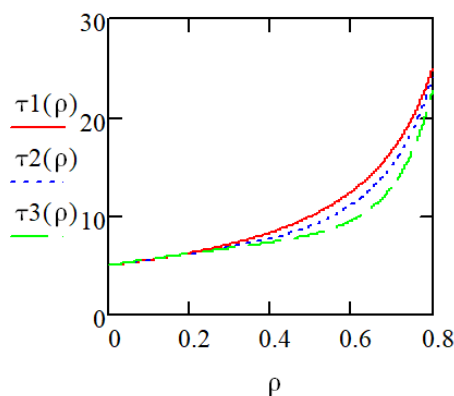


Рис. 6. Графіки залежності середнього часу затримки мережі від коефіцієнта використання каналів: крива $\tau_1(\rho)$ – статистичний розподіл пакетів; крива $\tau_2(\rho)$ – динамічний розподіл пакетів при $\alpha = 20\%$ і $N = 2$; крива $\tau_3(\rho)$ – динамічний розподіл пакетів при $\alpha = 20\%$ і $N = 4$

Аналіз графіків на рис. 6 показує, що динамічна маршрутизація ефективна лише за середнього вико-

ристання каналів. Однак варто зауважити, що дане порівняння динамічного та статистичного розподілів потоків пакетів проведено для рівномірного розподілу навантаження абсолютно надійною мережею. При перекосах навантажень та/або виникнення будь-яких пошкоджень на мережі динамічний розподіл потоків пакетів призводить до значно більшого ефекту.

Таким чином, динамічне управління розподілом потоків інформації найбільше ефективно в умовах надзвичайних ситуацій на мережі. При цьому, в умовах значного перевантаження мережі, застосування лише одного динамічного управління розподілом потоків інформації може не тільки не покращити, але навіть погіршити показники якості передачі повідомлень (затримка передачі повідомлень). Тому динамічне керування розподілом потоків інформації необхідно застосовувати у поєднанні з іншими методами і, в першу чергу, з методом керування обсягом потоку інформації, що надходить до мережі.

Висновки

Враховуючи вимоги сучасності та особливо того, що користувач цифрового майбутнього повинен мати можливість не лише отримувати різноманітні послуги високої якості, а й створювати необхідні йому послуги, пропонується будувати системи управління інфокомунікаційними мережами із застосуванням методів та технологій інтелектуальних мереж. Основною властивістю інтелектуальних систем управління є та обставина, що мережа передачі керуючої інформації побудована за концептуальною моделлю інтелектуальної мережі. При такому підході до синтезу мережі передачі інформації, що управляє, швидкість обробки на верхніх рівнях знижується зі зростанням «інтелектуальності», яка, у свою чергу, зменшується в міру просування вниз по транспортному рівню запропонованої моделі.

Запропоновано модель обслуговування вимоги до ІСУ, яка передбачає запровадження визначників керуючого впливу та централізованої логіки, дозволяє прискорити та спростити процес введення нових та корекції існуючих керуючих впливів, що позначається на економічності всієї мережі.

Одним із ефективних способів підвищення використання ресурсів мережі у надзвичайних умовах є динамічний розподіл потоків інформації. Для забезпечення динамічного розподілу потоків у мережі передачі інформації, що управляє, пропонується використовувати систему динамічного управління розподілом потоків, яка є підсистемою ІСУ. Визначено, що динамічна маршрутизація ефективна лише за середнього використання каналів. При перекосах навантажень та/або виникнення будь-яких пошкоджень на мережі динамічний розподіл потоків пакетів призводить до значно більшого ефекту.

Подальший розвиток запропонованого принципу динамічного управління розподілом потоків інформації полягає у необхідності застосовувати його у поєднанні з іншими методами і, в першу чергу, з методом управління обсягом потоку інформації, що надходить до мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tolubko V., Berkman L., Gavrilko E., Barabash O., Kilmeninov O. Development of methods to improve noise immunity in the fifth-generation mobile networks based on multiposition signals. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6, No. 9(96). P. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.152713>.
2. Laptiev O., Shuklin G., Savchenko V., Barabash O., Musienko A., Haidur H. The method of hidden transmitters detection based on the differential transformation model. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering (IJATCSE)*. 2019. Vol. 8, No 6. P. 2840–2846. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/26862019>.
3. Laptev A.A. Barabash O.V., Savchenko V.V., Savchenko V.A., Sobchuk V.V. The method of searching for digital means of illegal reception of information in information systems in the working range of Wi-Fi. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2019. Vol. 6, No. 7. P. 10101 – 10105.
4. Барабаш О. В., Лаптев О.А., Свинчук О.В., Соловійов Є.В., Бушков В. Г. Оцінка завадостійкості тракту виявлення радіосигналів. *Сучасний захист інформації*. 2020. № 1. С 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2020.011824>.
5. Бреславський В.О., Лаптев О.А., Правдивий А.М., Зозуля С.А. Розробка алгоритму маршрутизації самоорганізованих радіомереж. *Зв'язок*. 2020. № 6. С. 54 – 57.
6. Sezer S., Scott-Hayward S., Chouhan P.K., Fraser B., Lake D., Finnegan J., Viljoen N., Miller M., Rao N. Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks *IEEE Communications Magazine*. 2013. Vol. 51, No. 7. P. 36–43.
7. Gupta R.A., Chow M.-Y. Networked control system: overview and research trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57, No. 7. P. 2527–2535.
8. Kirk D.E. Optimal control theory: An introduction. Mineola. New York: Dover, 2004. 452 p.
9. Mahajan A., Martins N.C., Rotkowitz M.C., Yuksel S. Information structures in optimal decentralized control. *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2012. P. 1291–1306.
10. Lukova-Chuiko, N., Herasymenko, O., Toliupa, S., Laptieva, T., Laptiev, O. The method detection of radio signals by estimating the parameters signals of eversible Gaussian propagation. *2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2021 – Proceedings*. 2021. P. 67–70.
11. Kulin M., Fortuna C., De Poorter E., Deschrijver D., Moerman I. Data-Driven Design of Intelligent Wireless Networks: An Overview and Tutorial. *Sensors*. 2016. Vol. 16, No. 6. P. 790–796.
12. Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Рудык Л. В., Стец А. С. Система управления сетью связи второго уровня TMN с комбинированным принципом управления. *Зв'язок*. 2005. № 5. С. 66–69.
13. Hespanha J. P., Naghshtabrizi P., Xu Y. A Survey of Recent Results in Networked Control Systems. *Proceedings of the IEEE*. 2007. Vol. 95, No. 1. P. 138–162.
14. Kibria M. G. et al. Big Data Analytics, Machine Learning, and Artificial Intelligence in Next-Generation Wireless Networks. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 1284–1291.
15. Лаптев О.А., Собчук В.В., Собчук А.В., Лаптев С.О., Лаптева Т.О. Удосконалена модель оцінювання економічних витрат на систему захисту інформації в соціальних мережах. *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. 2021. Т. 4, № 12. С. 19–28.
16. Memos V. A. Efficient Multimedia Transmission over Scalable IoT Architecture. *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*. 2018. Vol. 10, No. 6. P. 27–39.
17. Dolinskiy R. Analysis of system with variable parameters, invariant to additive interference. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 4, No. 4(76). P. 20–24.
18. Sallai Gy. Defining Infocommunications and Related Terms. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2012. Vol. 9, No. 6. P. 5–15.
19. Климухин И. А. Основные понятия анализа и синтеза систем автоматического управления. *Альманах современной науки и образования*. 2012. № 11. С. 82–87.

Received (Надійшла) 16.05.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.08.2022

Intelligent control system for infocommunication networks

Lubov Berkman, Oleh Barabash, Andrii Musienko, Olga Tkachenko, Oleksandr Laptiev, Olha Svyinchuk

Abstract. The paper studies the conceptual model of an intelligent network, which is proposed to be used in the synthesis of a network for the transmission of control information in intelligent control systems for info communication networks. At the same time, the user of the digital future should be able not only to receive a variety of high-quality services but also to create the necessary services. It is shown that when synthesizing intelligent control systems, the following features should be taken into account: the processing speed at the upper levels of the conceptual model decreases with the growth of "intelligence", which, in turn, decreases as we move down the transport level of the proposed model. The principles of construction and architecture of the intelligent control systems are proposed, taking into account the current readings of measuring and information means. A model for servicing a requirement is proposed, which implies the introduction of determinants of control action and centralized logic. This allows you to speed up and simplify the process of introducing new and correcting existing control actions, which affects the efficiency of the entire network. The model separates service-related aspects from network-related aspects. This allows you to describe the services and capabilities of the intelligent control systems, regardless of the core network over which the intelligent add-on is created. It is shown that one of the effective ways to increase the use of network resources in emergency conditions is the dynamic distribution of information flows. To ensure dynamic flow distribution in the control information transmission network, it is proposed to use a dynamic flow distribution control system, which is a subsystem of the intelligent control systems. The dependences of the probability of choosing a bypass path on the channel utilization factor are analyzed. The average message delay time in the network is analyzed. It is shown that dynamic routing is effective only with average channel utilization. The comparison of dynamic and static distributions of packet streams for uniform load distribution over an absolutely reliable network is carried out. In case of load distortions and/or any damage to the network, the dynamic distribution of packet flows leads to a significantly greater effect.

Keywords: network, intellectualization, control system, synthesis, model, requirement, impact, distribution, flow.

В. В. Гавриленко, К. Є. Івохіна, Н. В. Рудоман

Національний транспортний університет, Київ, Україна

ПРО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІМІТАЦІЇ ВІДПАЛУ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ НЕЧІТКОЇ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА

Анотація. В даній статті розглянуто метод імітації відпалу для розв'язання нечіткої задачі комівояжера, яка формулюється як задача пошуку маршруту відвідування заданої кількості міст без повторень з мінімальною тривалістю пересування. Викладено зміст методу імітації відпалу, описано алгоритм формалізації методу. Наведено аксіоматику нечітких трикутних чисел. Сформульовано нечітку задачу комівояжера, у якій часові параметри пересування між містами задаються у вигляді правих нечітких чисел, величина носія в яких залежить від різних зовнішніх умов та факторів. Наведено результати розрахунків розв'язків задачі комівояжера у чіткій та нечіткій формах з різними параметрами зрізів нечітких чисел.

Ключові слова: задача комівояжера, метод імітації відпалу, алгоритм, нечіткі числа, множини рівня, формалізація часових інтервалів.

Вступ

На сьогоднішній день проблема пошуку найкоротшого шляху між двома пунктами є дуже актуальною: обсяги та потреби транспортно-логістичних послуг зростають щодня. Їх головна мета - побудова найточнішого маршруту для обслуговування максимальної кількості клієнтів. При цьому необхідно враховувати, що вибір невіддаленого шляху спричиняє додаткові витрати, уникати яких дуже важливо як з економічної, так і логістичної точок зору.

При цьому, варто відмітити, що існує набір факторів, що характеризують тривалість проходження шляху: наприклад, час доби, погодні умови, і навіть «навантаженість» проходження тієї чи іншої ділянки. Причому, для пошуку оптимального шляху необхідно враховувати їх взаємозв'язок. Для прикладу, довільна ділянка шляху у різний час доби має різне навантаження, а це значить, що тривалість проходження цієї ділянки буде відрізнятися в залежності від часу проходження. З іншого боку, погодні умови (туман, дощ) також є чинниками впливу на тривалість проходження ділянки.

Постановка задачі комівояжера (TSP, Travelling Salesman Problem)

Припустимо, що є представник торгівельної компанії (торговець або мерчендайзер), який хоче запропонувати або перевірити наявність товарів своєї фірми у пунктах продажу деякої сукупності міст конкретного регіону. Маршрут його руху повинен містити усі пункти, що прописані у завданні, причому, кожен з пунктів потрібно відвідати не більше одного разу. Такі подорожі забирають багато часу, тому логічно, що представник хоче скласти свій маршрут таким чином, щоб відстань, яку потрібно подолати, була мінімальною (в якості критерію може також розглядатися знаходження шляху мінімальної тривалості проходження або проходження з найменшими витратами). Пошук такого маршруту є основним завданням при розв'язуванні задачі комівояжера [1].

Задача комівояжера - комбінаторна задача, для розв'язання якої можуть бути використані методи математичного програмування. Щоб навести задачу

до загального вигляду, пронумеруємо міста числами $(1, 2, 3, \dots, n)$, а маршрут комівояжера опишемо циклічною перестановкою номерів $t = (j_1, j_2, \dots, j_n, j_1)$, причому усі j_1, \dots, j_n - різні номери. Номер j_1 , який повторюється з початку й у кінці, показує, що перестановка є циклічною [2].

Сукупність міст можна розглядати у вигляді вершин деякого графу з заданими відстанями (або часом пересування) між усіма парами вершин c_{ij} , які утворюють матрицю $C=(c_{ij})$, $i, j=1, n$. Вважаємо матрицю симетричною. Тоді формальне завдання полягає у тому, щоб знайти найкоротший маршрут (за часом або довжиною) t , який проходить через кожне місто та закінчується в точці відправлення. У такій постановці задача називається замкненою задачею комівояжера (TSP), яка є відомою задачею математичного цілочисельного програмування.

Математична модель задачі TSP

Нехай $I=\{1, \dots, n\}$ - множина індексів вершин графу задачі. Цільова функція - сумарний час проходження маршруту, що включає у себе усі вершини графу задачі. Параметрами задачі є елементи матриці $C=(c_{ij})$, $i, j \in I$.

Змінними задачі є елементи бінарної матриці переходів між вершинами $X = \{x_{ij}\}$, $i, j \in I$, які дорівнюють 1, якщо у побудованому маршруті для задачі присутнє ребро (v_i, v_j) , 0 - інакше [3]. Оптимальним маршрутом будемо називати найкоротший за часом маршрут:

$$E = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

з обмеженнями

$$\sum_{j \in I, j \neq i} x_{ij} = 1, \quad i \in I, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I, j \neq i} x_{ij} = 1, \quad j \in I,$$

$$v_i - v_j + n x_{ij} \leq n - 1, \quad 1 \leq i \neq j \leq n.$$

Остання нерівність забезпечує зв'язність маршруту обходу вершин, він не може складатися з двох і більше незв'язаних частин.

Алгоритми, що дозволяють вирішити проблему знаходження оптимального маршруту, можна поділити на точні та евристичні. Для невеликих задач (наприклад, з метою первинного проектування транспортної мережі малих розмірів) доцільно використовувати точні алгоритми, оскільки їх реалізації необхідні високі обчислювальні потужності, чого не можна сказати про реальні завдання: для них, як правило, необхідно використовувати евристичні алгоритми. Одним з таких методів є метод імітації відпалу [4].

Метод імітації відпалу

Підхід, що реалізований у методі імітації відпалу, запозичений з фізичних процесів. В його основу покладено процес кристалізації речовини, який знайшли металурги для підвищення однорідності металу.

Як відомо, у металів є кристалічні решітки, що визначають геометричне положення атомів речовини. Сукупність позицій всіх атомів називатимемо станом системи, кожному стану відповідає певний рівень енергії. Мета відпалу – привести систему до стану з найменшою енергією. Чим нижчий рівень енергії, тим «краще» кристалічна решітка, тобто, тим менше у неї дефектів і міцніше метал.

У ході відпалу метал спочатку нагрівають до деякої температури, що змушує атоми кристалічної решітки залишити свої позиції. Потім починається повільне та контрольоване охолодження. Атоми прагнуть потрапити у стан із меншою енергією, проте, з певною ймовірністю вони можуть перейти й у стан із більшою енергією. Ця ймовірність зменшується разом із температурою. Перехід у гірший стан, як не дивно, допомагає в результаті знайти стан з меншою енергією, ніж початковий. Процес завершується, коли температура падає до заданого значення.

Така складна схема з ймовірностями переходу з точки у точку необхідна для того, щоб алгоритм не зациклювався на локальному мінімумі, приймаючи його за глобальний оптимум. Для виходу з такої ситуації потрібно час від часу підвищувати енергію системи. При цьому, загальна тенденція до пошуку найменшої енергії зберігається. У цьому й є сутність методу імітації відпалу.

Алгоритм формалізації методу імітації відпалу

Для опису алгоритму введемо позначення:

S – множина усіх станів системи;

$f(s)$ – функція зміни стану;

s_i – стан системи на i -му кроці;

s_k – новий стан (кандидат);

t_{\min} , t_i , t_{\max} – мінімальна, поточна та вихідна температури відповідно;

$T(t)$ – функція зміни температури;

$E(s)$ – значення цільової функції.

Алгоритм починає працювати з вихідного стану s_1 , початковою температурою $t_1 = t_{\max}$ і з заданою мінімальною температурою t_{\min} .

Для усіх номерів $i=1,2,\dots$ поки $t_i > t_{\min}$ повторюємо:

- 1) $s_k = f(s_{i-1})$;

- 2) $\Delta E = E(s_k) - E(s_{i-1})$;

- 3) якщо $\Delta E < 0$, тоді $s_i = s_k$;

- 4) інакше прийняття нового стану відбувається з деякою ймовірністю $\exp(-\Delta E / t_i)$;

- 5) вибрати випадкове число M на інтервалі $(0,1)$;

- 6) якщо $\exp(-\Delta E / t_i) > M$, виконати перехід

$s_i = s_k$, інакше перейти до наступного кроку;

- 7) зменшити температуру $t : t_{i+1} = T(t_i)$;

- 8) повернути останній стан s_i , $i = i+1$.

Приклад розв'язання задачі методом імітації відпалу

Для демонстрації роботи алгоритму визначимо початкові дані. Розглянемо 100 міст, які випадково розташовані в квадраті (наприклад, 10×10 од.), $n=100$. Кожне місто, відповідно, представлене парою координат, час переміщення з кожного міста до інших задано матрицею $C=(c_{ij})$, $i,j=\overline{1,n}$ (рис. 1).

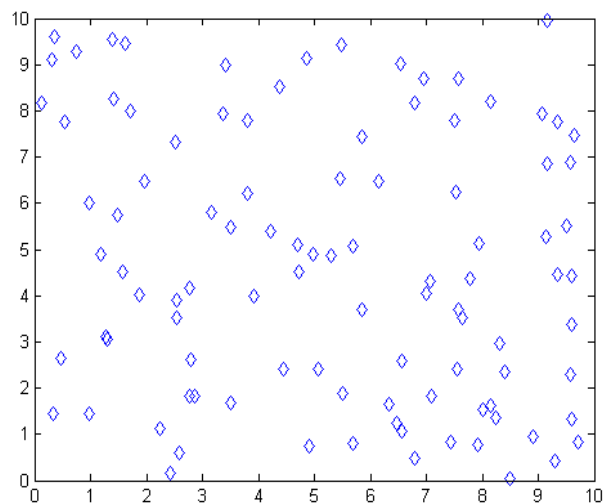


Рис. 1: Початкове розташування міст у тестовій задачі комівояжера

Для отримання нового стану $f(S)$ будемо міняти місцями два довільні міста у маршруті. Ідея правильна, але така зміна непередбачувано впливає на значення функції $E(s)$ і метод може працювати довго і не завжди успішно.

Хорошим варіантом у цьому випадку буде спосіб, за яким вибираються два довільні міста в маршруті та інвертується шлях між ними. Наприклад, для маршруту (1,2,3,4,5,6,7) за умови вибору номерів 2 та 7 процедура інвертування призводить до маршруту (1,7,6,5,4,3,2).

На рис. 2 зображено стан системи на першій ітерації, а на рис. 3 – результат на виході роботи алгоритму імітації відпалу.

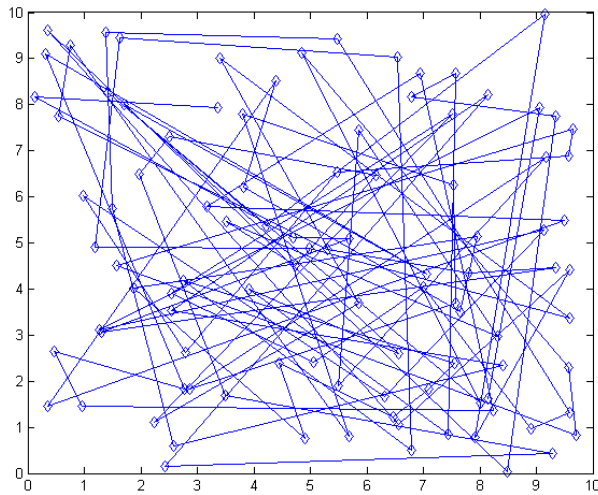


Рис. 2: Початковий стан системи (початковий маршрут)

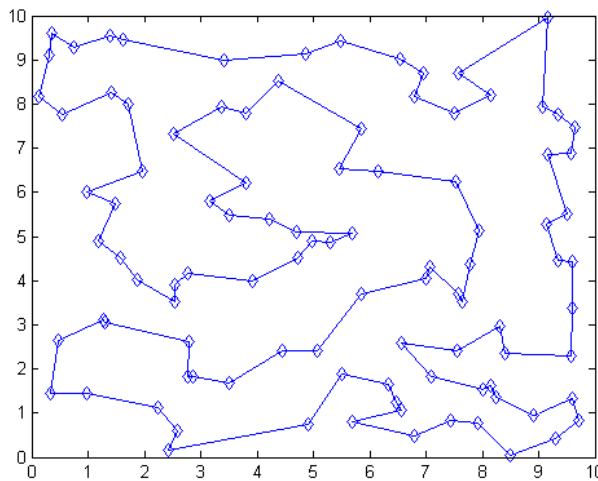


Рис. 3: Результат роботи алгоритму імітації відпалу (найкращий маршрут задачі комівояжера)

Остаточно, можна стверджувати, що незважаючи на те, що алгоритм у розглянутій реалізації працює відносно довго, конструктивність його застосування варто вважати досить ефективною. Потрібно також зазначити, що існують способи для покращення часу роботи алгоритму без втрати якості розв'язку (наприклад, метод динамічної адаптації [5]). Іншим цікавим напрямком досліджень у сфері застосування методу імітації відпалу є врахування факторів, що характеризують тривалість проходження ділянок маршруту. Відповідну невизначеність, яка з'являється у цьому випадку, можна формалізувати на основі нечітких чисел для вимірювання тривалості руху.

Аксиоматика нечітких чисел

Означення 1. [6] Нечітким трикутним числом \tilde{b} називають впорядковану трійку чисел $\tilde{b} = \{(a, b, c)\}$, $a \leq b \leq c$, для якої визначено функцію належності $\mu_{\tilde{b}}(x) \in [0, 1]$ вигляду:

$$\mu_{\tilde{b}}(x) = \frac{x-a}{b-a}, x \in [a, b];$$

$$\mu_{\tilde{b}}(x) = \frac{c-x}{c-b}, x \in [b, c]; \mu_{\tilde{b}}(x) = 0, x \notin [a, c].$$

Нечіткі числа є частинним випадком нечітких множин [7], у яких величина функції належності для довільного елемента визначає ступінь його належності до нечіткої множини.

Нечітке трикутне число вигляду (a, b, b) , що називається лівим нечітким трикутним числом [6], визначається функцією належності вигляду

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = 0, x < a;$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{x-a}{b-a}, x \in [a, b]; \mu_{\tilde{A}}(x) = 1, x > b,$$

а нечітке трикутне число вигляду (b, b, c) , що називається правим нечітким трикутним числом, – функцією належності

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = 1, x < b; \mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{c-x}{c-b}, x \in [b, c];$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = 0, x > c.$$

Для нечіткого числа \tilde{b} носієм

$$\text{supp } \tilde{b} = \{x \in X : \mu_{\tilde{b}}(x) > 0\}$$

є інтервал [6]. При цьому, для нечіткого трикутного числа $\tilde{b} = (a, b, c)$ носієм буде інтервал (a, c) , для правого нечіткого трикутного – інтервал $[b, c)$, для лівого нечіткого трикутного – інтервал $(a, b]$.

Множиною α -рівня (α -зрізом), $\alpha \in [0, 1]$ нечіткого трикутного числа $\tilde{b} = (a, b, c)$ є звичайна множина (інтервал):

$$\bar{b}_{\alpha} = \{x \in [a, c] : \mu_{\tilde{b}}(x) \geq \alpha\}, \alpha \in [0, 1].$$

Припустимо, що вимірювання часу відбувається за допомогою інтервалів однієї тривалості (такими інтервалами можна вважати будь-яку одиницю часу, наприклад, 1 годину, 1 день або 1 рік, в залежності від темпів процесу). Для оцінки нечіткого відліку часу потрібно спостерігати за реальним проміжком, в межах якого завершується кожен інтервал часу. В цьому випадку, «швидкий» плин одиниці часу може бути заданий правим нечітким трикутним числом с носієм, довжина якого менше тривалості часового інтервалу, а «повільний» – такого ж вигляду нечітким числом з носієм, довжина якого більша за тривалість інтервалу. Очевидно, що, якщо час «тече» природним чином, то величина носія даного нечіткого числа за довжиною співпадає з величиною одиничного часового інтервалу.

Математична модель нечіткої задачі TSP

Для формалізації нечіткої задачі комівояжера вважаємо, що час переміщення між містами відомі наближено. Припустимо, що за результатами спостережень можна визначити параметри тривалості пересування на кожній ділянці маршруту у вигляді правих нечітких трикутних чисел

$$\tilde{T}_{ij} = (T_{ij}, T_{ij}, T_{ij} + \delta_{ij}), i, j = \overline{1, n},$$

де $\delta_{ij} \geq 0$, $i, j = \overline{1, n}$, – допустимі затримки у часі

пересування, що залежать від різних факторів впливу на час проходження маршруту.

Зрозуміло, що у даному випадку параметри задачі, які задаються елементами матриці $C=(\tilde{c}_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$, є правими нечіткими трикутними числами $\tilde{c}_{ij} = \tilde{T}_{ij}$, $i, j = \overline{1, n}$. Цільова функція задачі комівояжера набуває вигляду

$$E = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} \tilde{c}_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (4)$$

яка разом з обмеженнями (2) є нечіткою оптимізаційною задачею [8], для розв'язання якої можна застосувати метод імітації відпалу.

Задамо деяке значення $\alpha \in [0, 1]$, яке буде визначати рівень впливу різних факторів на тривалість проходження ділянок маршруту. Це дозволяє для будь-якого правого нечіткого числа \tilde{c}_{ij} побудувати α -зрізи, які подаються у вигляді інтервалів часу, потрібних для подолання кожної з ділянок.

Застосовуючи метод імітації відпалу для крайніх значень цих інтервалів, розв'язуємо задачі комівояжера у найкращому та найгіршому випадках часу переміщення за маршрутом. За таких обставин отримуємо часовий інтервал, який надає оцінку значень критеріальної функції для обраного параметра $\alpha \in [0, 1]$. Мінімальне значення буде визначати час за ідеальних умов руху, максимальне – за умов врахування впливу факторів, що погіршують тривалість проходження ділянок маршруту. У табл. 1 наведено результати розрахунків, отриманих при розв'язуванні

задачі комівояжера для різних значень параметра $\alpha \in [0, 1]$.

Таблиця 1 – Результати розрахунків для нечіткої задачі комівояжера

Значення параметра α \ Часовий інтервал	Мін, год	Мах, год
$\alpha = 1$	117	117
$\alpha = 0.75$	117	127
$\alpha = 0.5$	117	159
$\alpha = 0.25$	117	164

Висновки

В даній статті розглянуто метод імітації відпалу для розв'язання нечіткої задачі комівояжера, яка формулюється як задача пошуку маршруту відвідування заданої кількості міст без повторень з мінімальною тривалістю пересування.

Викладено зміст методу імітації відпалу, описано алгоритм формалізації методу. Сформульовано нечітку задачу комівояжера, у якій часові параметри пересування між містами задаються у вигляді правих нечітких чисел, величина носія в яких залежить від різних зовнішніх умов та факторів.

Наведено результати розрахунків розв'язків задачі комівояжера у чіткій та нечіткій формах з різними параметрами зрізів нечітких чисел.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій/ К.: Видавничий дім «Слово», 2006. – 816с.
2. Гребенник І.В., Чорна О.С., Макарова Е.Е. Оптимізація лінійних функцій на множині циклічних перестановок з лінійними обмеженнями// Системи управління, навігації та зв'язку. - 2018. - №3(49). - С.67-72.
3. Rai S. and Ettam R. K. Simulation-based optimization using simulated annealing for optimal equipment selection within print production environments// Winter Simulations Conference (WSC), 2013. - Pp. 1097-1108.
4. Костенко О.М. Синтез оптимальних комбінаторних планів багатофакторного експерименту// Вісник полтавської державної аграрної академії. – 2016. - №1-2. – С.62-71.
5. Немцов М.В., Каук В.І. Дослідження методів оптимізації, які використовуються у компіляторах коду [Online] – International Electronic Scientific Journal “Science Online”. Available from: <http://nauka-online.com/>.
6. Bablu Jana and Tapan Kumar Roy. Multi-Objective Fuzzy Linear Programming and Its Application in Transportation Model // Tamsui Oxford Journal of Mathematical Sciences. – 2005. – V.21. – No.2. – P.243-268.
7. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Inf. Contr. - 1965. - V.8. - P. 308-353.
8. Zimmermann, H. J. Application of Fuzzy Set Theory To Mathematical Programming // Information Sciences. - 1985. – 36. – P. 25-58.

Received (Надійшла) 10.07.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.08.2022

On the application of the simulated annealing method for solving the fuzzy traveling salesman problem

V. Gavrilenko, K. Ivokhina, N. Rudoman

Abstract. This article discusses the annealing simulation method for solving the fuzzy traveling salesman problem, which is formulated as the problem of finding a route to visit a given number of cities without repetitions with a minimum travel time. The content of the annealing simulation method is presented, the method formalization algorithm is described. The axiomatics of fuzzy triangular numbers are given. A fuzzy traveling salesman problem is formulated, in which the time parameters of movement between cities are given in the form of right fuzzy numbers, the carrier value in which depends on various external conditions and factors. The results of calculations for solving the traveling salesman problem in clear and fuzzy forms with different parameters of slices of fuzzy numbers are presented.

Keywords: traveling salesman problem, simulated annealing method, algorithm, fuzzy numbers, level set, formalization of time intervals.

T. Dmytrenko, T. Derkach, A. Dmytrenko

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

DEVELOPMENT OF INFORMATION INTELLIGENT SYSTEM FOR MANAGEMENT OF SCIENTIFIC AND SCIENTIFIC-TECHNICAL ACTIVITIES HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Abstract. The information system of scientific and scientific - technical activity management is offered. Systems architecture design stages are considered. The general chart model of precedents for the further expansion and the activity diagram have been constructed. The developed behavior, sequence, branching and processes synchronization have been presented, which allowed to create a system of scientific and scientific - technical activity management of the higher education institutions. Modern web - technologies that allow to create interactive web - pages have been analyzed. The developed interface for data entry at the reporting level of departments has been presented. The main page of the information system, which contains all the basic structural elements, have been designed, the transition to which is carried out using hyperlinks.

Keywords: information intelligent control system, intelligent system, semantic text analysis, scientific activity of the department.

Introduction

Research in the HEI (higher education institutions) is a necessary element of teachers and student education activities. The structure of the university, as a rule, has a system of research units: laboratories at faculties and departments, public laboratories, research centers in the university structure, small businesses, which employ not only teachers and PhD students, but also students and project teams.

The importance of scientific work is presented primarily in the fact that the results and innovative professors and teachers' developments of higher education institutions have the shortest testing and implementation distance. They can be used in the educational process to enrich it, to develop new elective courses, textbooks and monographs. The scientific activity of a higher school teacher ensures the teaching trinity, science and practice, the realization of the cognitive and transformational function of science itself.

For effective organization management, it is necessary to use up-to-date data on its condition and the products quality. This task is also relevant for scientific and educational organizations. But evaluating their performance appears to be a difficult task, organizationally and technically at the same time. There are a large number of evaluation criteria, such as the total volume of scientific texts for the year, the number of publications, the Hirsch index, conference papers, the amount of performed work. Therefore, the question arises about the use of specialized automated systems for collecting, processing and submitting data on the scientific activities of research and teaching staff to solve these issues.

The management of scientific activity and innovation should include such areas as:

- planning and management of scientific research activities;
- accounting for the implementation results;
- results registration;
- financial management;
- preparation of reports on research activities.

With the help of the developed information system the collection and analysis of information on indicators of scientific, scientific-technical and innovative activity of scientific-pedagogical staff of the higher education institution is carried out. The collected information is used for the construction of analytical reports, as well as for the automated construction of scientific activity reporting forms.

Visualized analytical reporting allows you to review summary information for the selected period for all and individual departments as well.

Such process automatization of gathering information for reporting has several advantages. Using the same data saves staff time and makes reports consistent. Information about each work needs to be entered only once, after which the information is displayed in all reporting forms.

The main material

In order to develop an information intelligent system for managing the university scientific and scientific - technical activities, an information system for managing scientific and scientific - technical activities of the department was designed and programmatically implemented, which should ensure the following functions:

- differentiation between the user and administrative parts of the program module (administrator/editor/users):
 - editor (can add/delete/change scientific publications, check the text for uniqueness, available to teachers or scientists registered by the administrator);
 - administrator (can add/delete/change scientific publications, check the text for uniqueness, and also has the right to add/delete new users, namely editors)
 - user (can review publications, reports on scientific, scientific-technical and innovative activities of the department)
 - a registered user must be able to freely enter the module for managing scientific and scientific-technical activities using an individual unique login and

password. When he logs in, he gets access to scientific publications (where he can add a new publication with the ability to add a co-author, select relevant categories and other details);

- generation of reports on scientific, scientific-technical and innovative activities automatically;

- the system should be able to check the uniqueness of a scientific publication;

- ensure the development or addition (replenishment) of new publications and their categories;

- include a system for planning the date and time of scientific material publication in advance, which will automatically publish the article on the specified date and time);

- the ability to change the status of a published article:

- private status (the publication will not be displayed in the information system, even if it was published earlier);

- public status (the publication will be displayed in the information system, even if it has not been published earlier);

- the ability of the administrator to clear the database of no longer up-to-date data;

- the ability to save all the stages of creating a scientific publication with the possibility of returning it to the selected version.

- informational presence of the department on the Internet, the availability of reports on scientific, scientific-technical and innovative activities and scientific materials;

- simplicity and ease of navigation, that is, an intuitive interface for both the student and the teacher.

To meet these requirements, an architecture design was carried out, which includes the following steps:

1. Goals of system architecture design:

- analysis of interactions between analysis classes, subsystems identification and interfaces;

- clarification of the architecture, considering the possibilities of reuse;

2. Introduced global packages:

- foundation classes (lists, queues, etc.);

- error handling classes;

- mathematical libraries;

- utilities;

- Libraries from other vendors.

3. Design classes are defined:

- the analysis class is mapped to the design class if it is simple or represents a single logical abstraction;

- a complex analysis class can be divided into several classes, turned into a package or into a subsystem.

4. Examples of possible subsystems:

- classes that provide a range of services (for example, security and protection);

- limit classes that implement a complex user interface or interface with external systems;

- various products: communication software (middleware, COM/CORBA support), database access, data types and structures (stacks, lists, queues), general utilities (math libraries), various application products.

5. Highlighting architectural levels:

- Application Layer – contains elements of the application layer (user interface);

- Business Services Layer – contains elements that implement the business logic of applications (the most stable part of the system);

- Middleware Layer – provides platform independent services.

6. Database design.

7. Implementation of the system.

For a clearer representation of the designed software, a general model of a precedent diagram was built for further expansion (Use Case diagram).

This information system provides for three types of users (actors):

a) Editor (the editor can add/delete/change scientific publications, check the text for uniqueness, available to teachers or scientists registered by the administrator)

b) Administrator (administrator, can add/delete/change scientific publications, check the text for uniqueness, and also has the right to add/delete new users, namely editors)

c) Guest (guest, ordinary user is guests, can view publications, reports on scientific, scientific - technical and innovative activities of the department)

A system use cases diagram is shown in Fig. 1.

Diagrams describing the dynamics of the system include activity diagrams.

The Fig. 2 shows a diagram of the administrator's activity in the information system.

When modeling the behavior of a designed or analyzed system, it becomes necessary not only to present the process of changing its states, but also to detail the features of the algorithmic and logical implementation of the operations performed by the system. For this, an Activity diagram has been used. This type of diagram allows you to show not only the processes sequence, but also branching and even their synchronization. It allows you to design algorithms for the behavior of any complexity objects.

Designing the database, unique identifiers were defined - this is an attribute or a set of attributes and / or relationships that uniquely characterizes each instance of a given entity type. With full identification, an instance of this entity type is fully identified by its own key attributes, otherwise attributes of another entity, the father, also participate in the identification.

The following principles are used in the construction of the ER-model:

- the essences on the diagram are represented by rectangles;

- each rectangle can have different visual attributes;

- each entity must be assigned a unique name;

- entity names must be in the singular;

- links in the diagram are represented by lines going from one entity (table) to another;

- each connection is assigned a unique name;

- related tables are divided into parent and child; parent tables are displayed as rectangles with right angles, child tables are displayed with rounded ones.

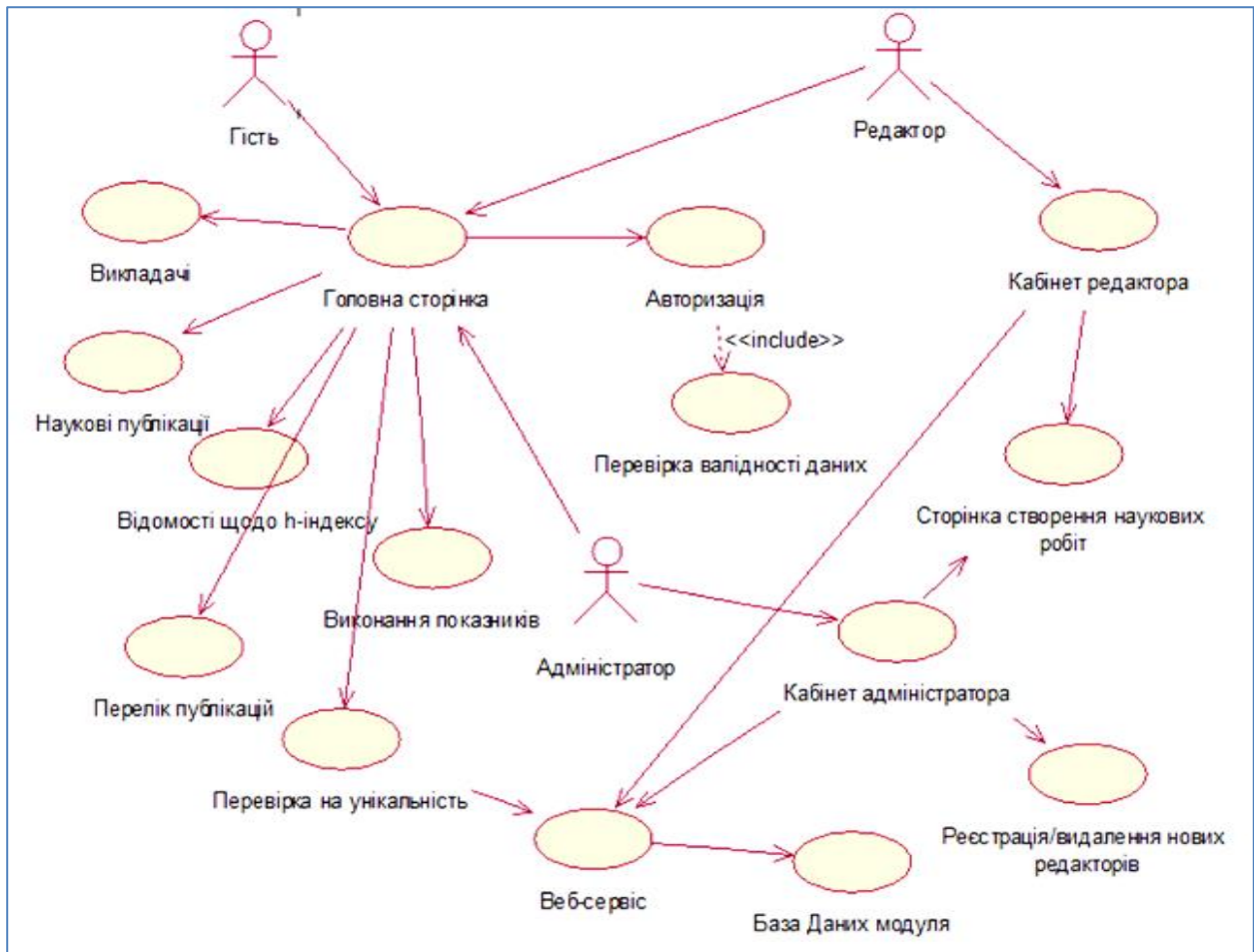


Fig. 1. Use Case Diagram

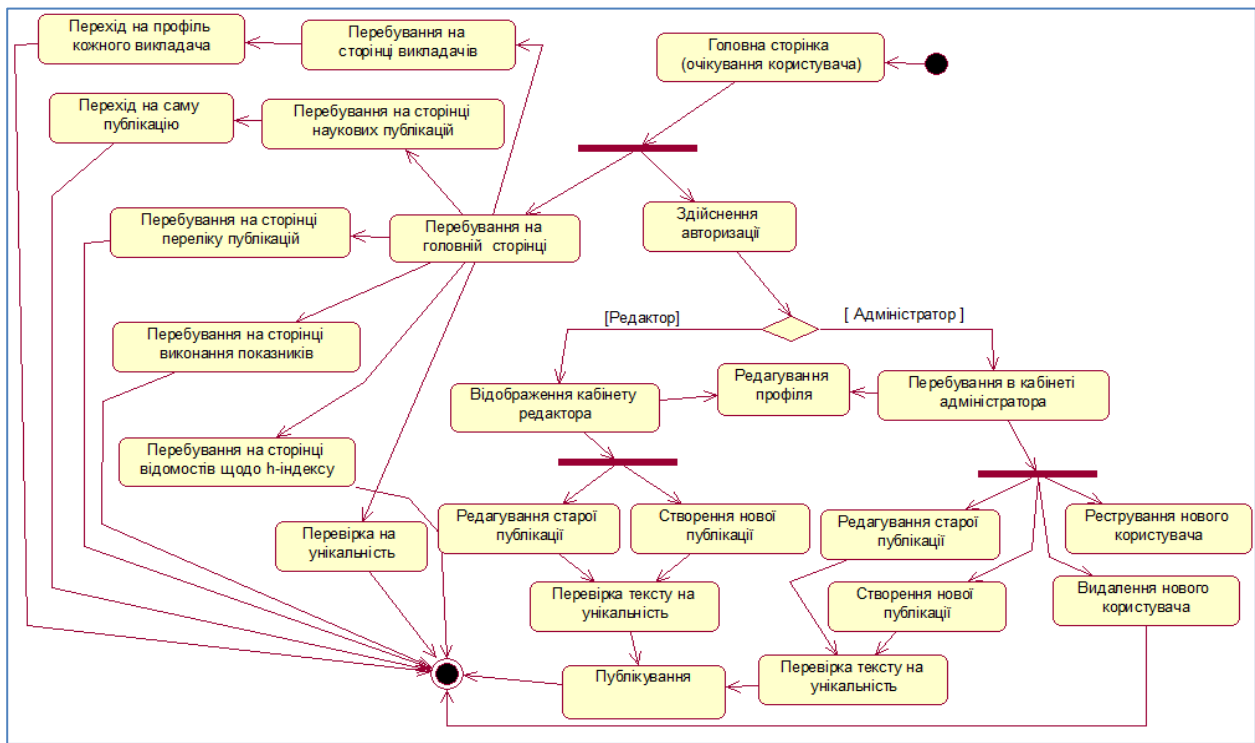


Fig. 2. Activity Diagram

WordPress uses several interconnected tables. For example, one page can have many comments. There are connections between them to each other. (Fig. 3).

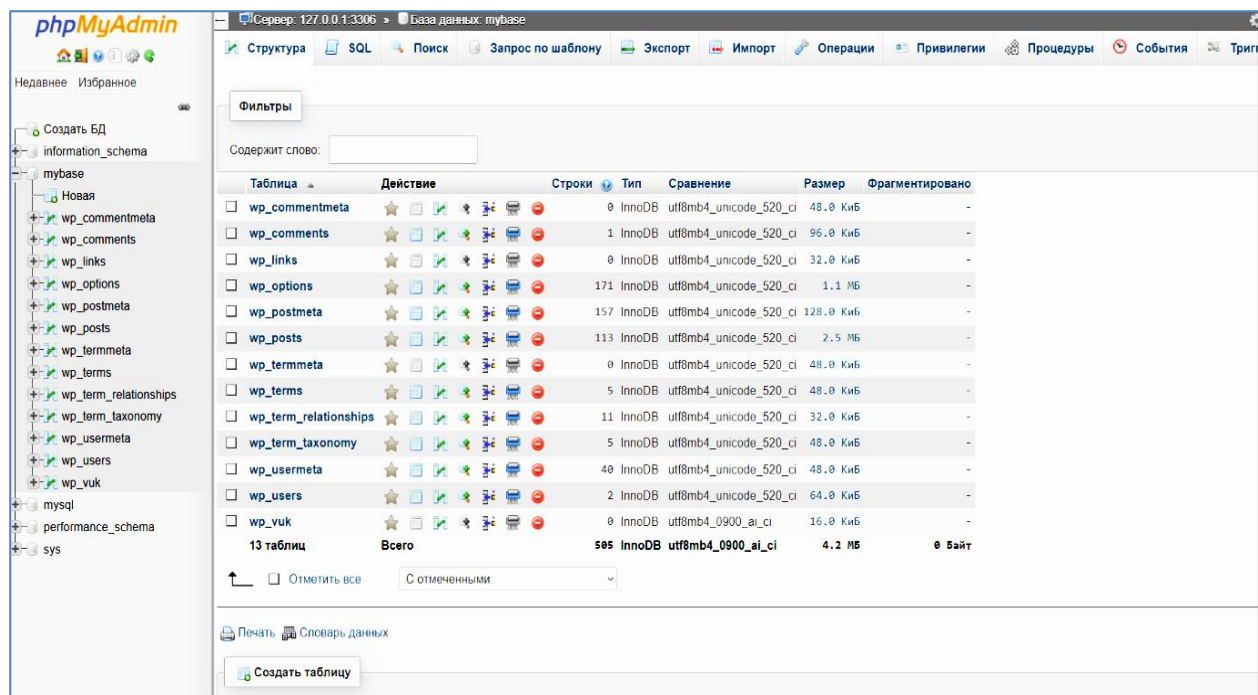


Fig. 3. Home page of the information system

Let's describe the database, it consists of the following main tables:

- a) wp_users (table of users), it stores all user data:
 - user_login (user login field);
 - user_pass (user password field);
 - user_nicename (user nickname field);
 - user_email (user email field);
 - user_registered (field of registration date of the student in the system);
 - user_activation_key (user activation key (sent to the mail to confirm registration));
 - display_name (name to be displayed on the display);
- b) wp_quiz_additional (table of scientific publications saving):
 - user_id (user id);
 - post_id (post id, ie publications);
 - date (publication date);
- c) wp_posts (posts table):
 - post_autor (the post author, in this case administrator or editor);
 - post_date (date of post creation);
 - post_content (filling the post, for example, the text of a scientific publication);
 - post_title (post title, for example, article title);
 - post_modified (date of last changes in the post);
 - post_status (post status);
 - post_type (post type, for example, article, slider, home page content);
- d) wp_postmeta (table for additional post data):
 - post_id (post id, ie publications);
 - meta_id (field for writing the custom field id);
 - meta_key (field for writing the name of the custom field);
 - meta_value (field for recording the contents of the custom field);
- e) wp_cimy_uef_data (user category table):

- user_id (user id);
- field_id (category confirmation);

Most tables are linked to one or more others by a single field. This field will be a unique identifier for each record (example post_id).

The main database encoding is utf8, collection utf8_general_ci. The choice of such an encoding was due to the need to use Cyrillic characters to display most of the text information, which allows the selected encoding. The length of the password field is 32 characters, this length was chosen because of the need to store a password hashed by the md5 system, which encodes exactly up to a size of 32 symbols. The scheme of the database is presented in Fig. 4.

The most efficient approach to designing a user interface is to design it by modeling the user's functions. At the beginning of the prototyping process, paper layouts of the interface were created, then screen forms were developed that simulated user interaction. It is desirable that end users actively participate in the interface design process. In some cases, users will help evaluate the interface. In others, they will help to find errors in itsex development [15].

To enter data at the reporting level of departments, an interface has been developed, shown in Fig. 5, 6.

The system is implemented in the form of an information system.

The content management system provides the administrator in the information system the ability to perform the following actions:

- a) adding and removing text;
- b) text editing;
- c) adding and removing graphics;
- d) editing supporting materials and appendices;
- e) adding and removing new and scientific works (articles, publications);
- f) registration of new users;

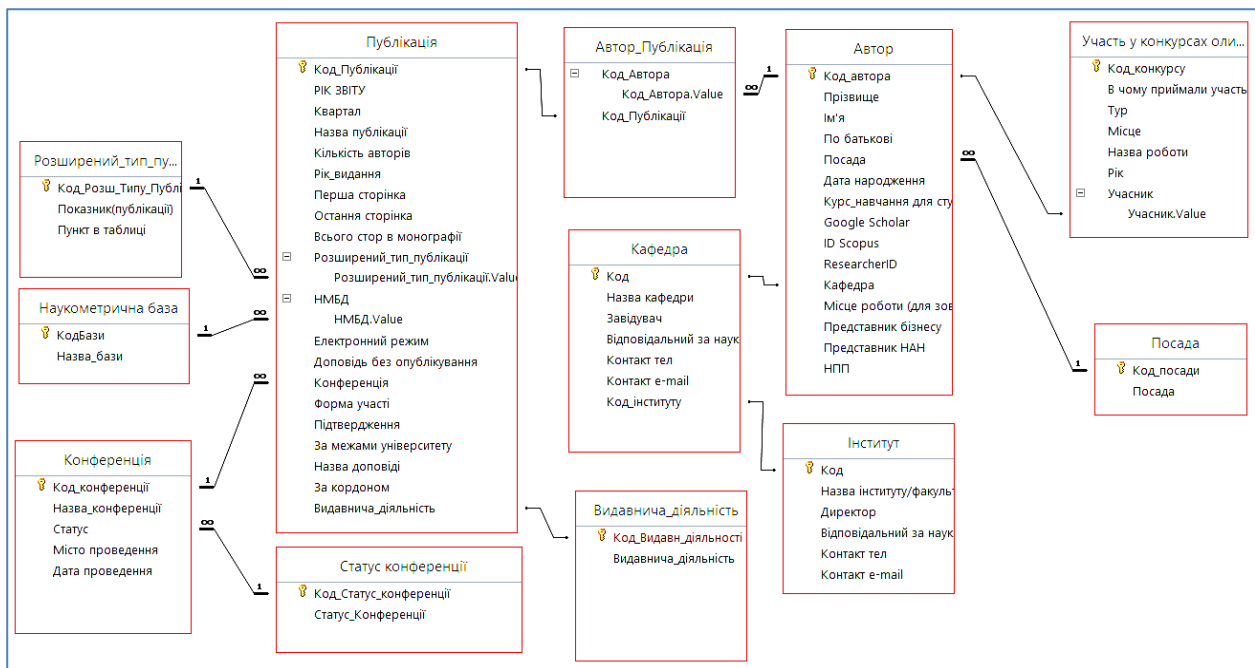


Fig. 4. Data scheme

g) managing the display of scientific, scientific-technical and informational publications;

h) adding and removing new categories for publications.

According to the developed structure, the main page of the information system was designed (Fig. 7). It contains all the basic structural elements, the transition to which is carried out using hyperlinks.

As planned at the stage of setting the task, the information system contains all the necessary structural and navigational elements.

The rules for accessing the system are defined for login.

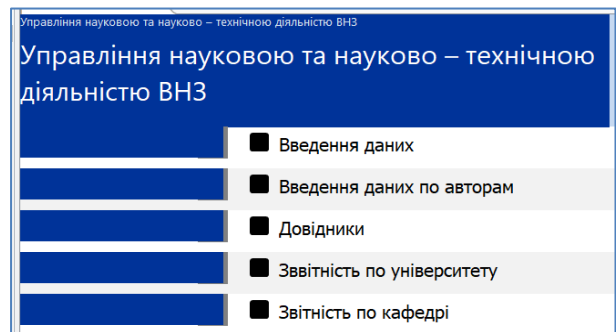


Fig. 5. Interface for managing the departments scientific activities

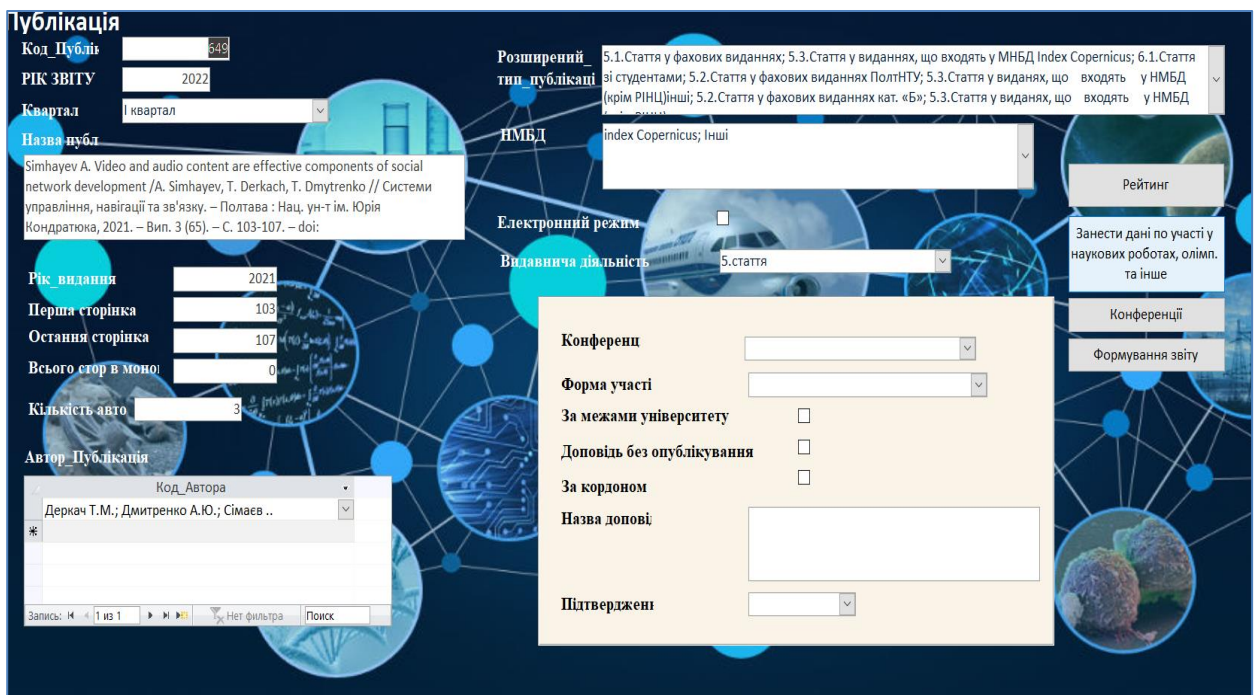


Fig. 6. Data entry interface for department reporting

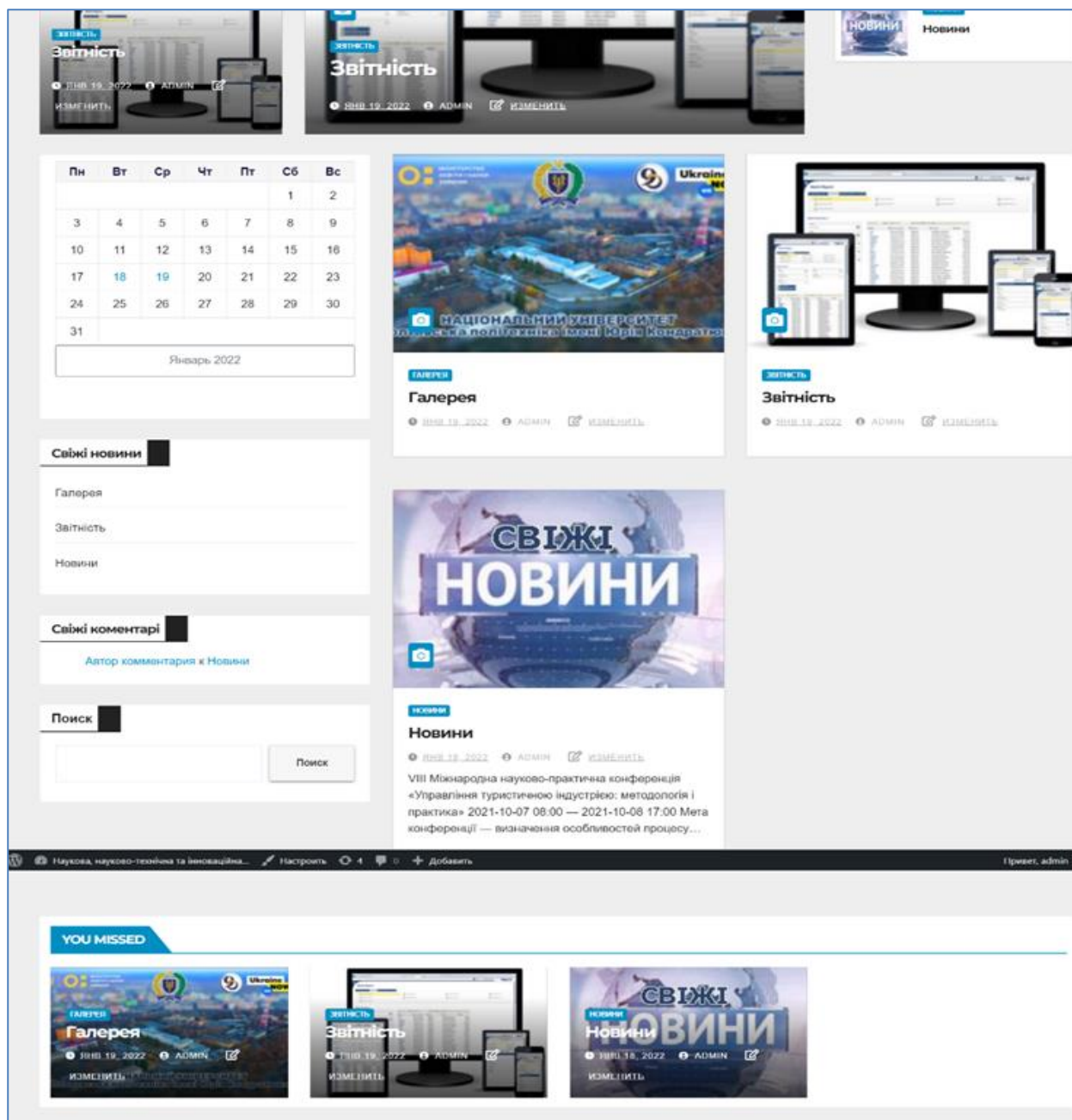


Fig. 7. Home page of the information system

Conclusions

As a result, according to the reference terms, the behavior, sequence, branching and synchronization of processes have been developed, which made it possible to create a system for managing the scientific and scientific-technical activities of the university.

The introduction of a management system for scientific and scientific-technical activities of the department allows:

a) reduce the time spent on creating, maintaining various reports of scientific publications of scientific and pedagogical workers;

b) automation of data collection on h-index and the number of citations of scientific and pedagogical workers, graduate students and doctoral students on Google - Scholar Citations;

c) checking the uniqueness of a scientific publication using semantic text analysis (and instructions for using this function were also provided);

d) convenient possibility of adding (replenishing) new scientific papers and their categories;

e) the possibility of planning the date and time of scientific material publication in advance, which will automatically publish the article on the specified date and time);

f) the ability to change the status of a published article:

a. private status (the publication will not be displayed in the information system, even if it has been published earlier);

b. public status (the publication will be displayed in the information system, even if it has not been published earlier);

g) the ability to save all stages of the scientific publication creation with the possibility of its return to the selected version.

This information system is primarily aimed at teachers and scientists of the Western Military District, students and ordinary users.

The purpose of creating the module is to ensure the management of the scientific and technical activities of the department, which will greatly facilitate the teachers work.

This software product has the following development prospects:

a) the system can be applied in different areas,

since the system is not tied to specific scientific categories, and the administrator can create them independently, depending on the specified needs;

b) further self-checking of the text for uniqueness during the process of writing the article is possible;

c) implementation of other reports types, depending on the tasks.

During the developing a software product, modern web technologies have been selected and justified, which allow creating interactive web pages.

The developed information system fully satisfies all the requirements at the stage of setting the task and is ready for operation.

REFERENCES

1. Atencio L. Functional Programming in JavaScript: How to improve your JavaScript programs using functional techniques / Luis Atencio – 1st ed. – New York: Manning Publications, 2016. – 272 с.
2. Haverbeke M. Eloquent JavaScript: A Modern Introduction to Programming / Marijn Haverbeke. – 3rd ed. – San Francisco: No Starch Press, 2018. – 463 с.
3. HTML [Електронний ресурс] // Wiki. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/HTML>.
4. Kevin Tatroe Programming PHP, 4th Edition / Kevin Tatroe – 4th ed. – Sebastopol: O'Reilly, 2020. – 544 с.
5. Learn to Code HTML & CSS [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.shayhowe.com/html-css/>.
6. XMLHttpRequest AJAX [Електронний ресурс] // ACOI. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://ua-referat.com/AJAX>.
7. Nixon R. Learning PHP, MySQL & JavaScript / Robin Nixon – 5th ed. – Sebastopol: O'Reilly, 2018. – 832 с.
8. PHP [Електронний ресурс] // Wiki. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/PHP>.
9. PHP: The Right Way [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://phptherightway.com/>.
10. Анісімов А.В. Інформаційні системи та бази даних: Навчальний посібник для студентів факультету комп'ютерних наук та кібернетики. / Анісімов А.В., Кулябо П.П. – Київ. – 2017. – 110 с.
11. Буч Г. UML. Класика Computer Science / Г. Буч, А. Якобсон, Д. Рамбо. – Петербург: Видавничий дім «Вільямс», 2006. – 736 с.
12. Вступ до PHP. Основний синтаксис PHP. [Електронний ресурс] // Ridnuym. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://ridnuym.narod.ru/>.
13. Гайдаржи В. І. Бази даних в інформаційних системах / В. І. Гайдаржи, І. В. Изварін. – Київ: Університет "Україна", 2018. – 418 с.
14. Документація "wordpress" [Електронний ресурс] // Wordpress. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wordpress.org/>.
15. Леонт'єв Б. В. Дизайн: Тонкості, хитрості і секрети / Б. В. Леонт'єв. – Харків: Майор, 2008. – 170 с.
16. Маклафлін Б. PHP и MySQL. Исчерпывающее руководство. 2-е изд. / Б. Маклафлін. – Питер: Санкт-Петербург, 2017. – 544 с.
17. Морзе Н.В. Інформаційні системи. Навч. посібн. / за наук. ред. Н. В. Морзе; Морзе Н.В., Піх О.З. – Івано-Франківськ, «ЛілеяНВ», – 2015. – 384 с.
18. Одноточник В. І. 1. Програмне забезпечення для обліку та звітності: аналіз ринку та функціоналу / В. І. Одноточник. // Бухгалтерський облік, аналіз та аудит: проблеми теорії, методології, організації. – 2016. – №2. – С. 128–135.
19. Основи UML [Електронний ресурс] // UML. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.kde.org/trunk4/uk/kdesdk/umbrello/uml-basics.html>.
20. Тестирование Web-сервисов [Електронний ресурс] // qalight. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://qalight.com.ua/kursy/testirovanie/testirovanie-web-servisov/>.
21. Технологія AJAX [Електронний ресурс] // ACOI. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://ua-referat.com/AJAX>.
22. Томсон Л. Розробка веб – додатків на PHP и MySQL / Л. Томсон, Л. Веллінг. – Харків: ДіаСофтЮП, 2009. – 870 с.

Received (Надійшла) 12.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.08.2022

Розроблення інформаційної інтелектуальної системи управління науковою та науково-технічною діяльністю ЗВО

Т. Дмитренко, Т. Деркач, А. Дмитренко

Анотація. Запропонована інформаційна система управління науковою та науково – технічною діяльністю ЗВО. Розглянуті етапи проектування архітектури системними побудовано загальну модель діаграми прецедентів для подальшого розширення та діаграму активності (Activity diagram). Представлено розроблену поведінку, послідовність, розгалуження й синхронізацію процесів, що дозволило створити систему управління науковою та науково – технічною діяльністю університету. Проаналізовані сучасні веб – технології, що дозволяють створювати інтерактивні веб – сторінки. Представлений розроблений інтерфейс для введення даних на рівні звітності кафедр. спроектована головна сторінка інформаційної системи, який містить всі основні структурні елементи, перехід за якими здійснюється за допомогою гіперпосилань.

Ключові слова: інформаційна інтелектуальна система управління, інтелектуальний система, семантичний аналіз тексту, наукова діяльність кафедри

Є. В. Івохін, М. Ф. Махно, В. О. Рець

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПРО ОДИН СПОСІБ АНАЛІЗУ ТОНАЛЬНОСТІ ТЕКСТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Анотація. У статті детально розглянуто теоретичні відомості основного підходу до тонального аналізу тексту, проведено дослідження на тему автоматизації цього процесу за допомогою машинного навчання та використання штучних нейронних мереж. Проаналізовано основний тип архітектури нейронних мереж для роботи з класифікацією тексту та визначено оптимальну конфігурацію для програмної реалізації аналізу тональності даних. Зроблено висновок, що серед можливих конфігурацій моделей штучних нейронних мереж найкраще виконують свою функцію мережі із двонаправленими LSTM шарами у вигляді GRU конфігурації. При цьому, точність результатів на пряму залежить від наявних наборів даних. Наведено результати порівняння точності результатів тренувань на обраних датасетах. Описано структуру програмної реалізації роботи сконфігурованої моделі ШНМ. Наведено приклад її застосування.

Ключові слова: аналіз тональності текстів, штучні нейронні мережі, класифікатори, двонаправлена модель, алгоритм роботи

Вступ

Аналіз тональності (іншими словами, емоцій, сентиментів, настроїв) є галуззю обчислювальних досліджень, метою якої є класифікація текстів як позитивних, негативних, нейтральних або ж належних до певної тональної групи [1]. Існуючі методи ефективних обчислень та аналізу настроїв можна розділити на три категорії: методи, засновані на знаннях, статистичні методи та гібридні методи. Технологія, заснована на знаннях, поділяє тексти на емоційні категорії на основі наявності досить відвертих емоційних слів. Поширені джерела слів-сентиментів або багатослівних виразів включають ефективний лексикон [2], схему лінгвістичних анотацій, WordNet-Affect, SentiWordNet, SenticNet [3] та ймовірнісні бази знань [4]. Основна слабкість методів, заснованих на знаннях, полягає в тому, що вони погано розуміють емоції, коли йдеться про мовні правила [5]. Більше того, дійсність методів, заснованих на знаннях, значною мірою залежить від глибини та широти задіяних ресурсів. Статистичні методи, такі як машини опорних векторів і глибоке навчання (англ. deep learning), широко використовувалися для класифікації настроїв тексту, тому дослідники використовували їх, наприклад, для таких проєктів, як класифікатори відгуків на фільми [6]. Забезпечуючи велику кількість навчальних наборів з текстом емоційних анотацій для алгоритмів машинного навчання, така система може не тільки вивчати емоційну валентність ключових слів афекту, а й враховувати валентність інших ключових слів і частоти спільного зустрічання слів. Слід зауважити, що ці методи є ефективними для категоризації тексту користувача лише на рівні сторінки або абзацу та погано працюють з меншими текстовими одиницями, такими як речення або слово. Гібридний підхід використовує як методи, засновані на знаннях, так і статистичні методи для виконання таких завдань, як розпізнавання емоцій та виявлення полярності з текстових або мультимодальних даних. Традиційні методи класифікації настроїв в основному засновані на правилах і машинному навчанні. Підходи, засновані на правилах, в основному використовують лексикони

тональностей, шаблони та статистичні характеристики, отримані з досвіду чи експертних думок, для класифікації настроїв тексту, ця техніка зазвичай вимагає значного ручного втручання [7]. А метод машинного навчання розглядає аналіз настроїв як проблему класифікації, він спочатку створює навчальний набір, позначаючи вручну частину даних, потім витягує та вивчає навчальні дані для побудови моделі класифікації, яка використовується для класифікації та прогнозування тестових даних з невідомими тегами.

Одним з найбільш ефективних підходів до розв'язання задачі класифікації тексту є використання методу глибокого (машинного) навчання, що проводиться на основі створення нейронної мережі для класифікації тексту.

Найбільш часто використовуваними моделями глибокого навчання в задачах аналізу настроїв є згорткові нейронні мережі (CNN) і повторювані нейронні мережі (RNN). CNN дозволяє виділяти високорозмірні особливості між локально сусідніми словами, використовуючи різні розміри “розсувних вікон” для векторів слів усіх слів речення. Однак, фільтр CNN має обмежену ємність слів і не може вловити довгострокові залежності, тому він, як правило, не дозволяє отримати семантичний зв'язок між несуміжними словами в реченні. На відміну від CNN, мережі RNN призначені для моделювання послідовності з контекстним семантичним захопленням, яке може застосувати вміст пам'яті до поточного сценарію. Завдяки таким функціям мережі RNN частіше використовуються для класифікації тексту. Однак для довгої послідовності даних традиційні нейронні мережі RNN можуть викликати “вибух” градієнта або його зникнення. Мережі довготривалої пам'яті LSTM (Long Short-Term Memory) [8], є особливим типом RNN, які дозволяють вивчати довгострокові залежності та використовувати ефект довготривалої короткочасної пам'яті в якості прихованих одиниць. LSTM мережі враховують залежність порядку між послідовностями слів, тому вони здатні залучати до розрахунків залежності як на близькі відстані між словами, так і на великі. Враховуючи потужність мережі в обробці довгих текстових повідомлень, LSTM відіграють велику роль в обробці

природної мови (NLP). Базові LSTM мережі сканують послідовності лише в одному напрямку, двонаправлена довготривала пам'ять (BiLSTM) [9] є її подальшим вдосконаленням, за яким сканування послідовності здійснюється в обох напрямках, забезпечуючи одночасний доступ як до прямого, так і до зворотного контекстів. Тому BiLSTM може вирішувати задачі моделі послідовності краще, ніж LSTM. Ці моделі нейронних мереж досягли великого успіху в завданні аналізу емоційної класифікації.

Розробка підходу до розв'язання задачі аналізу тональності

Для проведення неперервного аналізу та класифікації текстових повідомлень необхідно створити методику ефективної обробки та оцінки емоційного забарвлення (тональності) текстів. В якості конструктивного підходу пропонується використовувати BiLSTM архітектуру нейронної мережі у варіанті конфігурації з двонаправленим скануванням тексту. Реалізація у цьому випадку передбачає:

- 1) пошук датасетів, які містять ознаки емоційної класифікації з чотирма [10] або 6 класами [11];
- 2) утворення та тренування BiLSTM моделі на знайдених наборах даних;
- 3) порівняння ефективності використання BiLSTM з двома типами шарів – звичайним LSTM та з Gated Recurrent Unit (GRU) [12];
- 4) розробку програмних засобів для класифікації тональності вхідного тексту за допомогою отриманої нейронної мережі;
- 5) розробку сервісу по періодичному парсингу новинних ресурсів;
- 6) наповнення бази даних для збереження отриманих результатів;
- 7) створення мережі з використанням технологій брокера повідомлень для неперервної обробки текстів новин класифікатором емоцій;
- 8) написання демонстраційної веб-сторінки для візуалізації отриманих даних.

У якості тренувальних наборів даних було прийнято рішення використати англійські датасети з додаванням автоматичного перекладу до етапів попередньої обробки тексту.

Серед наявних англійських наборів даних найпопулярніші з них використовують бінарну класифікацію тональності тексту, тобто визначення лише “негативного” або “позитивного” емоційного забарвлення. Найповнішим датасетом такої класифікації є набір даних від IMDb [13], що включає в себе 50 тисяч рецензій на фільми з відповідною оцінкою. Очевидно, така класифікація не є достатньо повною для досягнення поставленої мети розробки, але саме цей набір даних використовується у більшості сучасних досліджень.

Для проведення повноцінного дослідження тональності необхідно мати набір даних з описом не менш, ніж 4 класів емоцій (у більшості випадків такі датасети не мали більше 3-4 тисяч класифікованих записів, що не дозволило б мати достатню точність під час тренування нейронної мережі). Кінцевими знахідками виявились два набори даних – на 20 та на 40 тисяч записів, перший з шістьма класами, другий з тринадцятьма. Обидва набори містять тексти повідомлень соціальної мережі Twitter, але перший має лише прості тексти з видаленими знаками пунктуації та літерами нижнього регістру, тоді як другий містить повноцінні повідомлення різної довжини. При цьому перший датасет є відносно збалансованим (рис. 1, 2)

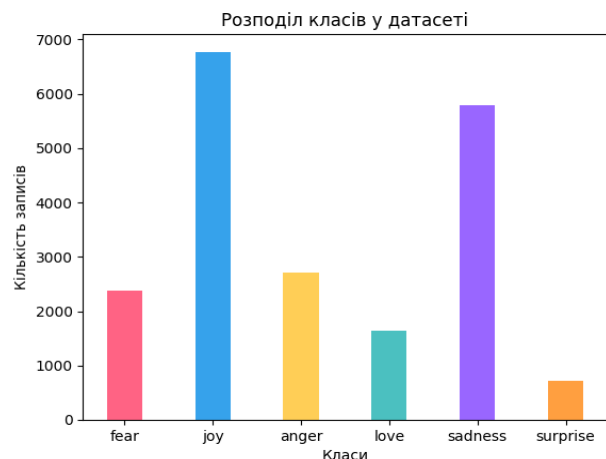


Рис 1: Структура навчального набору даних з шістьма класами

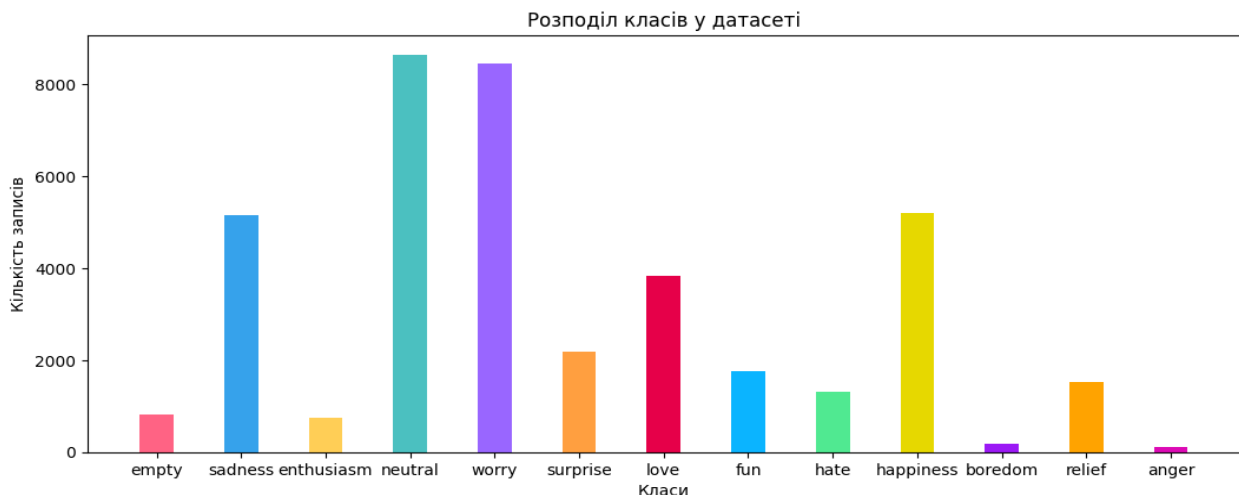


Рис 2: Структура навчального набору даних з тринадцятьма класами

Відповідно, точність тренування моделі на першому наборі матиме вищу точність, але менший спектр результатів, другий же датасет буде мати меншу точність але більшу кількість класів у результаті. Перед тренуванням мережі запропоновано проводити етапи попередньої обробки: видалення всіх спеціальних символів hex-формату; розбиття тексту на слова; видалення службових слів та артиклів; зведення слів до їх початкових форм; об'єднання слів назад в текст. Спростивши текст, маємо набір ключових слів в їх початкових формах, що полегшує роботу нейронної мережі, оскільки таким чином загальна архітектура мережі зводиться до однієї цілі – класифікації емоцій, замість додавання шарів для попередньої обробки і, як наслідок, ускладнення процесу тренування. В якості першого шару моделі, що обробляє текст, обрано вбудований шар, який виконує перетворення слів у векторну форму, тобто у вигляд, що найоптимальніше сприймається нейронною мережею [14]. Такий шар було отримано з попередньо розрахованого шару з 1 мільйоном оброблених слів ресурсу Wikipedia [15].

Архітектура моделі ШНМ для аналізу тональності тексту

Для повноцінного аналізу сформуємо архітектуру нейронної мережі, що складається з трьох основних шарів:

1. Вбудований шар для переведення слів у векторну форму
2. Двонаправлений шар з довгою короткочасною пам'яттю (BiLSTM)
3. Ущільнюючий шар для виведення результатів.

Для порівняння отриманих результатів проведено тренування на двох датасетах з використанням звичайного LSTM та GRU шарів, результати (точність тренування кожної конфігурації) представлені у табл. 1:

Таблиця 1 – Порівняння точності результатів тренувань на обраних наборах даних

Датасет \ Тип класифікатора	LSTM	GRU
20к записів	0.7290	0.7965
40к записів	0.3524	0.3696

З наведених результатів видно, що перший набір даних виконує свою функцію краще з точки зору тестування. При цьому, у випадку тестування на справжніх даних, натренована на другому наборі модель дає кращі результати. Це можна помітити, перевіряючи роботу нейронних мереж (GRU конфігурації), оскільки вона має вищу точність тренування на текстах новин і художніх текстів (табл. 2).

Таблиця 2 – Приклад застосування ШНМ з GRU класифікатором

Тестовий текст \ Модель	Мережа 1 датасету	Мережа 2 датасету
Латвія за два місяці віддала Україні третину оборонного бюджету, - президент Левітс	Joy (радість)	Neutral (нейтральність)
Російське МЗС ввело санкції у відповідь проти США. Їх запровадили проти всіх 398 членів Палати представників – нижньої палати Конгресу	Joy (радість)	Neutral (нейтральність)
Європейський союз схвалив подальшу військову допомогу Україні на загальну суму 1,63 мільярда доларів. Новий пакет фінансуватиме забезпечення Збройних Сил України обладнанням та предметами постачання, у тому числі засобами індивідуального захисту, аптечками та пальним, а також військовою технікою, що призначена для доставки летального озброєння в оборонних цілях.	Joy (радість)	Worry (занепокоєння)
Максимум квітів – від немофіл до сакури – в одному кадрі чекає туристів у парку Хінояма в японському місті Сімоносеки. Заодно можна помилуватися величезний міст, що з'єднує острови Хонсю і Кюсю.	Surprise (здивування)	Happiness (щастя)
Коли сакура опадає, це теж страшенно красиво. Земля або вода, рівномірно всипані рожевими пелюстками, чудові. А найкраще йти під дощем із пелюсток і відчувати, як краса буквально тече крізь тебе.	Sadness (смуток)	Love (любов)

Недоцільні дані при використанні, здавалося б, більш точної моделі першого датасету, пояснюються природою його даних: внаслідок вже проведеної попередньої обробки вони могли втратити попередній сенс та/або могли бути сконцентровані на іншій тематиці за рахунок меншої кількості записів у наборі даних у порівнянні з другим набором. Низька точність тренування другого датасету, в свою чергу, може бути спричинена незбалансованістю набору даних, але завдяки різноманіттю тем цей набір дає

змогу натренувати та використати нейронну мережу для класифікації текстів різної тематики. Таким чином, для практичного використання у системі аналізу тональності було обрано нейронну мережу, натреновану на другому датасеті з шаром GRU.

Програмна реалізація роботи моделі ШНМ

Виходячи, з того, що програмна система, яка моделює роботу отриманої ШНМ складається з декількох незалежних сервісів, було прийнято рішення

розробити її засобами оточення Docker Compose [16], що дозволяє побудувати Docker контейнери для кожного описаного сервісу, після чого об'єднати їх в ізольовані мережі. Розробка на основі Docker контейнерів – в даному випадку найшвидший спосіб розробити сервіси, які в можуть бути встановленими у середовищі будь-якої серверної архітектури за мінімальний час і які можуть дублюватися для прискорення обробки великих наборів вхідних даних.

Серед запропонованих сервісів є три основні компоненти: парсер новин, що збирає тексти новин та їх метадані для подальшої обробки; класифікатор тональності отриманих текстів; візуалізатор оброблених даних. Для обміну даними між парсером та класифікатором було реалізовано сервіс-брокер повідомлень RabbitMQ в окремому контейнері, що забезпечує збереження вхідних даних (в цьому випадку текстів новин) до моменту обробки їх класифікатором. В свою чергу, оброблені дані зберігаються у базі даних PostgreSQL, яка теж реалізована в окремому контейнері. Візуалізація відбувається завдяки поєднанню двох сервісів: бекенд-частини системи на NodeJS + Fastify, що представляє собою сервер з доступом до бази даних і з відкритим інтерфейсом (API) для доступу даних у базі даних; фронтенд-частини на NodeJS + ReactJS,

який завдяки функціональній архітектурі та реалізації отримання даних з бекенду на основі хуків глобального стану подає накопичені дані у вигляді графіків відповідно до обраного джерела новин.

Висновки

В роботі детально розглянуто теоретичні відомості основного підходу до тонального аналізу тексту, проведено дослідження на тему автоматизації цього процесу за допомогою машинного навчання та використання штучних нейронних мереж.

Проаналізовано основний тип архітектури нейронних мереж для роботи з класифікацією тексту та визначено оптимальну конфігурацію для програмної реалізації аналізу тональності даних.

Зроблено висновок, що серед можливих конфігурацій моделей штучних нейронних мереж найкраще виконують свою функцію мережі із двонаправленими LSTM шарами у вигляді GRU конфігурації. При цьому, точність результатів напряму залежить від наявних наборів даних. Наведено результати порівняння точності результатів тренувань на обраних датасетах. Описано структуру програмної реалізації роботи зконфігурованої моделі ШНМ. Наведено приклад її застосування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Cambria, Erik, et al.* A practical guide to sentiment analysis. – 2017.
2. *Ortony, Andrew, Gerald L. Clore, and Allan Collins.* The cognitive structure of emotions. Cambridge university press, 1990.
3. *Cambria, Erik, Daniel Olsher, and Dheeraj Rajagopal.* SenticNet 3: a common and common-sense knowledge base for cognition-driven sentiment analysis// Twenty-eighth AAAI conference on artificial intelligence, 2014.
4. *Swapna Somasundaran, Janyce Wiebe, and Josef Ruppenhofer.* Discourse level opinion interpretation. In Proc. of the 22nd Int. Conf. on Comp. Linguistics, 2008. Vol.1 (COLING '08). Association for Computational Linguistics, USA, 801–808.
5. *S. Poria, E. Cambria, A. Gelbukh, F. Bisio, A. Hussain.* Sentiment data flow analysis by means of dynamic linguistic patterns, IEEE Comput. Intell. Mag. 10 (4). – 2013.
6. *R.Y. Lan, Y. Xia, Y. Ye.* A probabilistic generative model for mining cybercriminal networks from online social media, IEEE Comput. Intell. Mag. 9 (4). – 2014. – Pp. 31–43.
7. *Chesley, Paula, et al.* Using verbs and adjectives to automatically classify blog sentiment// Training 580.263 (2006): 233.
8. *Zhu, Xiaodan, Parinaz Sobihani, and Hongyu Guo.* Long short-term memory over recursive structures// Proc. International Conference on Machine Learning. PMLR, 2015.
9. *Alex Graves, Jürgen Schmidhuber.* Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures// Neural Networks, 2005. – Vol. 18. – Iss.5–6.
10. *Izard, Carroll E.* The substrates and functions of emotion feelings: William James and current emotion theory// Personality and Social Psychology Bulletin 16.4 (1990): 626-635.
11. *Ekman, Paul.* "Emotions revealed." Bmj 328.Suppl S5 (2004).
12. *Yao, Kaisheng, et al.* Depth-gated recurrent neural networks// arXiv:1508.03790 9 (2015).
13. IMDb Datasets [Online] – Available from: <https://www.imdb.com/interfaces/>
14. *Luong, Minh-Thang, Richard Socher, and Christopher D. Manning.* Better word representations with recursive neural networks for morphology// Proceedings of the seventeenth conference on computational natural language learning. 2013.
15. English word vectors[Online] – Available from: <https://fasttext.cc/docs/en/english-vectors.html>
16. *Ian Miell, Aidan Hobson Sayers.* Docker in Practice. - Manning Publications. – 2019.

Received (Надійшла) 10.07.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.08.2022

About one way to analyze the sentiment of texts using artificial neural networks

E. Ivokhin, M. Makhno, V. Rets

Abstract. The article discusses in detail the theoretical information of the main approach to tone analysis of the text, conducted research on the topic of automating this process using machine learning and the use of artificial neural networks. The main type of architecture of neural networks for working with text classification is analyzed and the optimal configuration for the implementation of data sentiment analysis is determined. It is concluded that among the possible configurations of artificial neural network models, networks with bidirectional LSTM layers in the form of a GRU configuration perform their function better. At the same time, the accuracy of the results directly depends on the available data sets. The results of comparing the accuracy of training results on the selected datasets are presented. The structure of the software implementation of the configured ANN model is described. An example of its application is given.

Keywords: text sentiment analysis, artificial neural networks, classifiers, bidirectional model, operation algorithm.

V. Kozlov¹, Yu. Kozlov², O. Novikova¹, V. Olenchenko¹

¹ National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

DEFINITION AS A DEFINITIVE ASPECT SENSE OF THE STUDY PROBLEM

Abstract. In any field of human activity, especially in scientific and educational work, the use of not very accurate and ambiguous terms makes it difficult, and sometimes impossible to understand some of the provisions and the research problem in general. Terms, in general, are the language of science, form the semantic core of a special language of the industry and convey basic meaningful information. It should be emphasized that usually the first among the standards of any industry is a standard with a list of basic terms and concepts. It is made taking into account the requirements of fixed content, accuracy (clarity), brevity. This approach allows you to achieve the truth when discussing any hypothesis, idea, opinion, problem or question. The article shows how the contradictions related to the peculiarity of the English translation of the word “competence” and the ambiguous interpretation of this term in dictionaries, which causes confusion and makes it difficult to implement the competence method in educational activities in the post-Soviet space. Unambiguous key concepts are offered, which provided an opportunity to develop and implement in practice information technology to support decision-making on the results of professional training and activities of the specialist. The development is preceded by the creation of a model of the relevant subject area or object of analysis, such as a law enforcement specialist. The result is a thesaurus and alphabetical index used by an expert to limit the properties of the object being evaluated. To describe the subject area by the heuristic method and to present knowledge in the decision support system, the result is presented in the form of a frame. The definitive approach can be extended to the procedure of developing any scientific work – textbook, monographs, dissertations and more.

Keywords: term, definition, information technology, decision making, competence.

Formulation of the problem

The experience of the authors in higher education shows that the use of not very accurate and ambiguous terms and their definitions makes it difficult to understand some provisions in educational and scientific activities. Therefore, we will define definitions that relate to the definition itself as the main aspect of the meaning of the problem in any area of human activity, without going deep into the definition, or rather, in lexicographic and linguistic analysis of the problem.

Analysis of information sources. We will combine information from authoritative sources [1].

Definition (latin *definitio*) - a short definition, interpretation of the concept, an explanation (wording) that accurately establishes, reveals, clarifies the meaning, meaning of something. The concept - a logical general opinion, information about something.

Closely related to these definitions is the word “term” - the name of a certain concept of any branch of professional (industrial, service, creative, scientific, pedagogical, etc.) activity (work, occupation) - a word or word formation. It should be noted that the query “terms” (in the sense of “concept”) in the search engines Google, Bing, Meta and Yandex found 17.1, respectively; 1.3; 13.4 and 21.9 million links.

Terms are the semantic core of a special language of the industry, conveying basic content information. In general, terms are the language of science. Terms are the object of ordering and standardization, as well as lexicographic work in the creation of terminological dictionaries of different levels and purposes. The limits of the terms are set by legislative, regulatory, administrative, administrative and / or other documents. The first among the standards of any, in particular scientific, field of activity, is usually the standard of basic terms and concepts. When developing it, special requirements are taken into account [2, 3]:

- fixed meaning of the term - one sign corresponds to one concept;

- accuracy of the term (clarity, limited meaning) - the term must directly or indirectly reflect the features by which you can distinguish one concept from another;

- unambiguousness of the term - the absence of conceptual (ideographic) synonyms;

- systematicity of the term based on the classification of concepts;

- shortness of term.

Thus, the use of terms that meet the above requirements when discussing hypotheses, ideas, opinions, problems or issues, etc., allows us to achieve the truth.

The above allows us to determine **the purpose and objectives of the article** - to show the feasibility of a definitive approach in the study and discussion of any problem in any field of human activity.

Presenting main material

The results of the discussed approach will be shown by an example, which is set out in the production plan in the publication [4] and discussed in detail in the article [5]. In short, the essence of the question is to eliminate the contradiction due to the peculiarity of the translation from English of the word “competence” and definitions from dictionaries [1]; a striking example of the resulting confusion is the monograph [6]. As a result, the ambiguous interpretation of the term “competence” inhibits the implementation of the competence method (CM) [7] in the education system in the post-Soviet space. [5] unambiguous short definitions of key concepts are offered: “competency” (from Ukrainian “компетентність”, in the sense of expertise), “competence” (from Ukrainian “компетенція”, in the sense of professional capacity) and “qualification”. As the example shows, they are suitable for the development and implementation of information

technology decision support (ITDS) on the results of training and activities of a specialist in law enforcement [8].

The development of ITDS is preceded by the creation of a model of the relevant subject area or object of analysis (OA). The term "model" in the general sense - created to obtain and (or) store information specific object (in the form of an imaginary image, description of symbolic means or material system), which reflects the properties, characteristics and relationships of the original object arbitrary nature, essential for the task to be solved by some subject [9]. An object model can be informational, described by some verbal features. Such a model is usually developed by highly qualified experts using literary and electronic sources of information - encyclopedias, state standards, dictionaries, industry and departmental documents, basic scientific papers, textbooks, etc. - as well as personal experience.

For example, the model (professiogram) of a law enforcement specialist includes (according to the introduced definitions [5]) the competence of the suitability of the C_S , the training of the C_T , the education of the C_E and the competence of the professional activity of the C_{PA} :

$$M_S = C_S \cup C_T \cup C_E \cup C_{PA}. \quad (1)$$

The components of C_S , C_T , C_E are especially important in the initial selection to assess a person's suitability for a particular type of professional activity, and the component of C_{PA} can be used to monitor the quality of daily activities of the specialist and his compliance with the position. The composition of professionally significant C_S properties of a law enforcement specialist (determines the competence of the suitability of the C_{PA} is established by relevant legislative, regulatory and administrative documents.

Competence of C_T education presupposes the presence of a list of general (only positive) personality traits (inherited and acquired) - accuracy, demanding, ingenuity, etc., as well as strong-willed character traits (discipline, initiative, etc.). Literary and electronic sources explain the definitions of properties and traits, their synonyms and antonyms. Negatives are excluded from the vector of signs (antonymic in lexical and antagonistic - in the broadest sense of the word, such as (type in Ukrainian "чесність-брехливість", "скромність-нескромність", "ввічливість-грубість", etc.). This procedure performs the function of substitution. This means that when evaluating each of the personality traits, the expert-selected evaluation partially (close to the middle of the scale) or completely (within the scale) excludes the opposite quality, as in the Dempster-Schaeffer and Saati scales. Competence of C_E education may include in the set of characteristics the average scores in the disciplines of previous level training, professional training, test results, etc.

Competences of professional activity of C_{PA} are set in the form of the list of powers (rights and duties) of the specialist (or the official). These components are reduced to a thesaurus [10] - a description of many states of a model of the environment, a dictionary of names of concepts and their classification links, designed for a single

unified and formalized presentation of information in an automated system; description of an ordered set in a verbal record, in fact - an information model of any subject area. For our case, it is a means of presenting knowledge to describe the subject area by the heuristic method in the form of a frame. The frame defines the class of the object and includes the frame name (concept), the slot name (the term itself), the slot value (term definition). An alphabetical index of concepts, terms and definitions is used as a linguistic means of data manipulation [11].

The level of competency's and competencies is assessed by experts - managers, colleagues, employees or colleagues, subordinates, etc. - by assigning points on a four-point scale. The results obtained - personograms - for each of the objects of analysis are averaged by experts, calculate the generalized characteristic (or coefficient of conformity, or modified concordance coefficient). Finally, a ranking list of OA is compiled, which is submitted to the person who decides on the person's suitability for a certain type of professional activity, determining the qualification level of the specialist and suitability for the position. These operations are performed by the decision support system (DSS) as a means of implementing information technology [11]. The main functions of DSS: creation of a single knowledge base and database; organization and maintenance of knowledge base at the request of the user - administration, modification, editing; delimitation of access to the components of the database in accordance with the powers of a particular user; organization and maintenance of the database at the request of the user - administration, modification, accumulation of data; customizing the user interface to specific requirements; data processing and formation of reporting documentation with various semantic features as of the current time and for a certain period.

One of the three key concepts of the competence method, along with competence and competence, is the concept of "qualification" - an official reflection of the degree of technical or professional skills of the worker, recognized at the international, national or industry level [6]. This means that for a specialist of a certain level of qualification there must be a model that determines the level of his competency - education (and training) - on the one hand, and on the other - a subjective characteristic that reflects the quality of his professional activity. For example, for an athlete or a locksmith it is a category, for a scientist or a teacher of a certain level it is a corresponding education, scientific degree and/ or academic title, ie a qualification level that meets certain requirements. We emphasize that this compliance can be established on formal grounds, by expert evaluation, instrumental measurements, etc., the results of which can be processed using DSS.

Note that the above-mentioned frame description generally serves to present knowledge in DSS, and the definition of the term (slot value) - for the expert, in order to clearly limit the specific property (feature) of the object being evaluated.

Conclusions and prospects for further research

The example considered in the article shows that the definition as a defining aspect of the meaning of the

studied problem allows to solve the problem of the implementation of CM in the educational process. The competency method can also be used to solve choice problems in any field of human activity and to develop information technology to support decision-making. In this case, the sectoral focus of DSS will be determined by the content of its knowledge base, in particular, thesaurus and alphabetical index. Experience shows that the definition approach can be extended to the procedure of developing any scientific work – textbook, teaching and teaching materials, monographs, dissertations, research reports and more. The presence in the work of a thesaurus and an alphabetical index as a model of the subject area provides ease of use and clarity of the meaning of the problem under discussion. Further research should be

aimed at solving problems of developing methods for assessing the following competency's:

- cognitive competency – knowledge of methodological, didactic and methodological, subject-professional, organizational and technological techniques and the ability to apply them in the practice of daily professional activities in a particular field;
- information and communication competency – knowledge, skills and abilities in the field of information and telecommunication technologies of a certain level of professional activity;
- competency of self-improvement – certain knowledge, skills and abilities in the field of learning technology (psychophysiology of mental work, organization of self-study, rational reading, etc.).

REFERENCES

1. Ozhehov S. Y. Slovar' russkogo yazyka [Dictionary of the Russian language]. – M., Rus. yaz., 797 s., 1987. (in Russian).
2. Ryabova E. A. Teoretycheskiye aspekty yzucheniya terminov [Theoretical aspects of the study of terms]. *Vestnyk Mosk. hosud. obl-ho un-ta*, № 2, s. 86-91, 2009. (in Russian).
3. Leychyk V. M. Terminovedeniye: predmet, metody, struktura [Terminology: subject, methods, structure]. – M., LKY., 254 s., 2007. (in Russian).
4. Kozlov V. Ye., Kobzyev V. H., Kozlov Yu. V., Moshchenko I. O. Kompetentnisnyy metod otsinyuvannya profesiynoy diyal'nosti spetsialista. Definitivnyy aspekt [Competence method for assessing the professional activities of specialists. Definitional aspect]. *Zb. tez dopovidey Mizhnar. nauk. internet-konf. "Informatsiyne suspil'stvo: tekhnologichni, ekonomichni ta tekhnichni aspekty stanovleniya"* 08 lypnya 2020 r. (vyпуск 50) – Ternopil', 2020. – S. 8-9. (in Ukrainian).
5. Kozlov V. Ye., Kozlov Yu. V., Moshchenko I. O., Novykova O. O. Otsinyuvannya profesiynoy diyal'nosti spetsialista na osnovi kompetentnisnoho pidkhotu [Evaluation of the professional activity of a specialist on the basis of the competence approach]. *Zb. nauk. prats' Nats. akad. NH Ukrayiny*, 2020. – Vyp. 1(35). – S. 94-101. (in Ukrainian).
6. Kompetentnostnyy podkhod v obrazovatel'nom protsesse. Monografyya [Competence approach in the educational process. Monograph]. A. E. Fedorov, S. E. Metelev, A. A. Solov'ev, E. V. Shlyakova – Omsk: Yzd-vo OOO Omskblankyzzdat, 2012. – 210 s. PDF. Available at: <http://window.edu.ru/files/kompetentnost>. (in Russian).
7. Holovan' M. S. Kompetentsiya i kompetentnist': dosvid teorii, teoriya dosvidu [Competence and competence: the experience of theory, the theory of experience]. *Vyshcha osvita Ukrayiny*, № 3, 2008. – S. 23-30. (in Ukrainian).
8. Kozlov V., Novykova O. Metod pobudovy ranzhyruvanykh spyskiv kandydativ na zamishchennya posad u spetspidrozdilakh syl okhorony pravoporyadku [Method of constructing ranked lists of candidates for replacement positions in special units of law enforcement forces]. *Zb. nauk. prats' Nats. akad. NH Ukrayiny*, vyp. 2(24), 2014. – S. 80-82. (in Ukrainian).
9. Neumyn Ya. H. Modely v nauke y tekhnike. Ystoryya, teoriya, praktyka [Models in science and technology. History, theory, practice]. – Lenynhrad: Nauka, 1984. – 190 s. (in Russian).
10. Avtomatyzovani systemy. Terminy ta vyznachennya [Automated systems. Terms and definitions]. DSTU 2226-93. – Vved. 1994-07-01. – Kyiv: Derzhstandart Ukrayiny, 1994. – IV. 92 s. (in Ukrainian).
11. Kozlov V., Kozlov Y., Moshchenko I., Novykova O., Olenchenko V. Implementation information technology of competency assessment method of professional activity of the educational system employee. *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5, No. 3, P. 142-150.

Received (Надійшла) 14.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.08.2022

Визначення як визначальний аспект сенс проблеми дослідження

В.С. Козлов, Ю. В. Козлов, О. О. Новикова, В. Т. Оленченко

Анотація. У будь-якій сфері людської діяльності, особливо в науковій і навчальній роботі, вживання не дуже точних і багатозначних термінів ускладнює, а іноді й унеможливує розуміння окремих положень і проблеми дослідження в цілому. Терміни, загалом, є мовою науки, утворюють семантичне ядро спеціальної мови галузі та передають основну змістовну інформацію. Слід підкреслити, що зазвичай першим серед стандартів будь-якої галузі є стандарт із переліком основних термінів і понять. Складається з урахуванням вимог фіксованості змісту, точності (ясності), стислості. Такий підхід дозволяє досягти істини при обговоренні будь-якої гіпотези, ідеї, думки, проблеми чи питання. У статті показано, як протиріччя, пов'язані з особливістю англійського перекладу слова «competence» та неоднозначним тлумаченням цього терміна в словниках, що викликає плутанину та ускладнює впровадження компетентнісного методу в освітню діяльність на пострадянському просторі. простір. Запропоновано однозначні ключові поняття, які дали можливість розробити та впровадити в практику інформаційні технології підтримки прийняття рішень за результатами професійної підготовки та діяльності фахівця. Розробці передують створення моделі відповідної предметної галузі чи об'єкта аналізу, наприклад спеціаліста правоохоронних органів. Результатом є тезаурус і алфавітний покажчик, які використовуються експертом для обмеження властивостей об'єкта, що оцінюється. Для опису предметної області евристичним методом і представлення знань у системі підтримки прийняття рішень результат подається у вигляді фрейму. Дефінітивний підхід можна поширити на процедуру розробки будь-якої наукової праці – підручника, монографії, дисертації тощо.

Ключові слова: термін, визначення, інформаційні технології, прийняття рішень, компетентність.

Р. Е. Пащенко^{1,2}, М. В. Марюшко²

¹ Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України, Україна

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

ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ВРОЖАЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЧІТКОГО ОПИСУ ЧИННИКІВ ВПЛИВУ ТА ІНДИКАТОРІВ СТАНУ ПОСІВІВ

Анотація. Предметом дослідження є оцінка можливості прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур при нечіткому описі чинників впливу та спеціальних індикаторів стану рослин. **Об'єктом** дослідження є визначення рівня врожаю в заданий момент часу при відомих чинниках впливу та індикаторах стану рослин, які отримуються з використанням дистанційних засобів. **Метою** є розгляд методу та обґрунтування прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур при нечіткому опису чинників, що на нього впливають, та індикаторів стану посівів. **Завдання:** аналіз різноманітних методів моніторингу стану сільськогосподарських культур та прогнозування їх врожаю; визначення чинників впливу на рівень врожаю та індикаторів стану посівів; розгляд можливості представлення чинників впливу та індикаторів з використанням теорії нечітких множин; оцінка можливості використання даних дистанційного зондування для отримання чисельних значень чинників впливу та індикаторів стану посівів; розробка методу прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткого опису чинників впливу та індикаторів стану посівів; обґрунтування прийняття рішення про рівень врожаю сільськогосподарських культур при заданих значеннях чинників впливу та індикаторів стану посівів. **Отримані наступні результати.** У результаті дослідження було введено нечіткий опис чинників впливу та індикаторів стану посівів. Показано, що нечіткий опис може застосовуватися для чинників впливу, що визначаються, як кількісно, так і якісно. На основі такого опису розроблено метод прийняття рішення про рівень врожаю з урахуванням індексу NDVI і фрактальної розмірності. Наведено результати визначення різних ступенів рівня врожаю для чотирьох різних наборів значень чинників впливу та індикаторів стану посівів. Показано, як нечіткі значення чинників та індикаторів у різному ступені впливають на оцінку рівня врожаю. **Висновки.** Описаний в даній роботі метод прогнозування дозволяє аналізувати, як різні набори значень чинників впливу та індикаторів стану посівів змінюють прогнозований рівень врожаю сільськогосподарських культур.

Ключові слова: дані дистанційного зондування Землі, прогнозування рівня врожаю, нечіткий опис чинників впливу, індекс NDVI, фрактальна розмірність.

Вступ

Попереднє оцінювання обсягів майбутнього врожаю (прогнозування врожайності) відіграє важливу роль у роботі сільгоспвиробників, яке дозволяє оцінити доходи і втрати, що очікуються, та здійснювати ефективне планування подальших робіт. В останні десятиліття для вирішення задач моніторингу стану сільськогосподарських угідь та прогнозування урожайності все більше застосовують данні дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1, 2]. Це обумовлено перш за все оперативністю та наочністю таких даних, що отримуються з великих територій супутниками ДЗЗ (Terra, Aqua, NOAA-20, Landsat 8, Sentinel-2). В умовах швидкої зміни вегетаційного стану сільськогосподарських культур супутники ДЗЗ дозволяють отримувати космічні знімки з просторовим розрізненням від 250 до 10 метрів та з періодичністю від 1 до 8 діб [3]. У теперішній час на борту супутників ДЗЗ розташовуються різноманітні датчики (сенсори), за допомогою яких отримуються дані про різні параметри атмосфери (аерозолі, температуру і вологість, характеристики хмарності, стан озонового шару, забруднення повітря і т.д.), а також про поверхню Землі (характеристики ґрунтового-рослинного покриву, температура, паводкова обстановка і т.д.). Також космічні знімки отримані в різних діапазонах довжин хвиль використовуються для визначення різних вегетаційних індексів, а також для розрахунку фрактальних розмірностей космічних зображень [4].

Для моніторингу стану сільськогосподарських культур та прогнозування їх врожаю використовують різноманітні методи, коротка характеристика яких наведена у роботі [5]. У роботі зазначено, що методи прогнозування врожаю розподіляються на методи, що ґрунтуються на оцінках фізичних особливостей навколишнього середовища (статистичний метод і метод механістичних моделей росту рослин), методи прямого оцінювання вмісту хлорофілу (наземні вимірювання цієї величини SPAD-датчиками) та методи, що використовують дані ДЗЗ (методи, що використовують регресійні моделі та вегетаційні індекси і методи, які базуються на оцінці стану рослинності, таких як LAI і біомаси). Кожен із зазначених методів має свої переваги і недоліки. Під час застосування статистичних методів необхідно мати велику кількість наземних вимірювань, що підвищує їх трудомісткість і складність виявлення залежностей у великих наборах даних. Побудова механістичних моделей також базується на великій кількості вхідних даних, крім того такі моделі, як правило, застосовують тільки для одного виду рослин. Велика кількість наземних вимірювань також необхідна під час застосування методу прямого оцінювання вмісту хлорофілу. Методи, які використовують регресійні моделі, стикаються з проблемою вибору типу функції, що адекватно описує процеси, що відбуваються. Така ж проблема виникає і під час застосування методів, які використовують вегетаційні індекси, що обумовлено їх великою кількістю [6] і вибором найкращого з них.

Крім того, для розрахунку вегетаційних індексів необхідні данні двох і більше спектральних діапазонів (багатоспектральні знімки), що ускладнює апаратуру отримання космічних знімків. Трудомісткими також є розрахунки індексів LAI і біомаси.

Всі зазначені методи прогнозування врожаю сільськогосподарських культур використовують накопичену інформацію про різноманітні чинники впливу на формування врожаю. Такі чинники можна розподілити на наступні типи [7]:

- природні (інтенсивність світла, температура навколишнього середовища, концентрація вуглекислого газу в атмосфері, вологість повітря, природна родючість ґрунту і т.п.);

- біологічні (органічні добрива, сорт насіння, гібриди);

- організаційно-техногенні (обробка ґрунту, терміни і способи посіву та посадки, мінеральні добрива, меліорація, засоби захисту рослин).

Зазначені вище природні чинники можна віднести до об'єктивних чинників, що не залежать від діяльності людини, а біологічні та організаційно-техногенні – до суб'єктивних чинників. Під час прогнозування рівня врожаю будемо вважати, що всі суб'єктивні чинники можуть або виконуватися, або не виконуватися, або виконуватися частково. Об'єктивні (природно-кліматичні) чинники передбачити не можливо і тому їх прогнозування може відбуватися тільки на основі експертних даних. При цьому експертиза може розглядатися в нечіткій постановці. Тому виникає необхідність розв'язання задачі оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур за прогнозованими значеннями чинників, що на нього впливають в нечіткій постановці.

Наявність великої кількості методів прогнозування врожаю, а також великий вплив на результат прогнозу об'єктивних чинників, які дуже важко врахувати під час оцінки врожайності, показує, що задача ефективного прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур є актуальною і до кінця не розв'язаною.

При оцінці рівня врожаю сільськогосподарських культур дані дистанційного зондування можуть використовуватися для отримання чисельних значень чинників впливу та індикаторів стану посівів.

Метою статті є обґрунтування прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур при нечіткому опису чинників, що на нього впливають, та індикаторів стану посівів.

Метод прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур

Оцінка рівня врожаю сільськогосподарських культур заснована на врахуванні чинників впливу на врожайність та індикаторів стану посівів, що описуються за допомогою теорії нечітких множин. Це обумовлено тим, що чисельні значення чинників та індикаторів визначаються в умовах відсутності необхідної статистики про ступінь їх впливу на врожай. Крім того, різні чинники у різному ступені впливають на врожай сільськогосподарських культур, а їх спільний вплив дуже складно оцінювати під час прийняття

рішення про величину врожаю. Певні чисельні значення цих чинників можуть характеризувати різний рівень врожаю. Тому порівняльна оцінка декількох рівнів врожаю сільськогосподарських культур пов'язана з постановкою та розв'язанням багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Під час розв'язання цієї задачі, застосування методу аналізу ієрархій, який розглядається в [8], дозволяє у якості критеріїв оптимізації використовувати відповідні чинники (як кількісні так і якісні), що впливають на врожай. Застосування інших методів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, таких, як методи виділення основного критерію, формування узагальненого критерію і послідовних поступок, обмежено тим, що формування основного або складання узагальненого критерію, а також зведення їх виміру до однієї шкали викликає дуже великі труднощі.

На підставі розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі методом аналізу ієрархій розроблено метод прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткого опису чинників впливу та індикаторів стану посівів. Спрощена структурна схема методу наведена на рис. 1. Розглянемо застосування запропонованого методу для прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур при різних значеннях і комбінаціях чинників впливу та індикаторів стану посівів. На початку визначимо, чинники, що впливають на рівень врожаю.

До біологічних чинників найчастіше відносять застосування органічних добрив, вибір сорту насіння, використання гібридів рослин, що пристосовані до умов клімату у і ґрунту. Також значну роль під час формування врожаю відіграють попередники, тобто культури, які були посіяні на цьому полі у попередній сезон. Органічні добрива значно впливають на водне і повітряне живлення рослин, тому їх застосування впливає на рівень врожаю. Не менше впливати на отримання високого врожаю може застосування високоякісних сортів насіння і гібридів рослин. Вибір сорту повинен залежати від місцевих ґрунтово-кліматичних умов і пристосований до виробничих умов. За рахунок цього можна підвищити рівень врожаю на 15-20% [7].

До організаційно-техногенних чинників відносять обробку ґрунту, терміни і способи посіву та посадки, застосування мінеральних добрив, меліорацію, використання засобів захисту рослин. Обробка ґрунту спрямована на створення сприятливих умов для зростання і розвитку кореневої системи рослин, накопичення вологи, а також на боротьбу з бур'янами. Для отримання високого врожаю здійснюються заходи щодо кращого з агротехнічної точки зору укладене насіння в ґрунт та дотримання найбільш сприятливих для даної місцевості термінів посіву і посадки. Проведення цих робіт в неоптимальні терміни призводить до істотного зниження врожаю. Внесення мінеральних добрив здійснюється з урахуванням наявних в кожному господарстві матеріалів агрохімічного обстеження земель і розміщенням посівів на ґрунтах із сприятливою реакцією на них ґрунтового середовища.

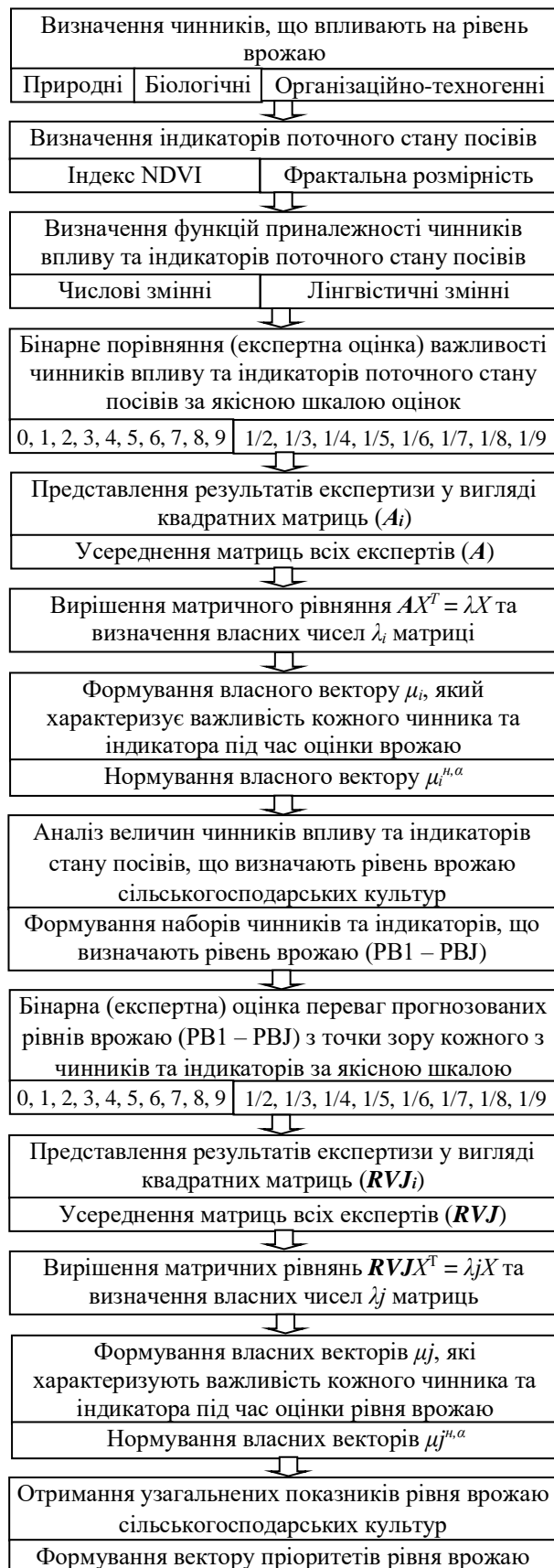


Рис. 1. Спрощена структурна схема методу прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур

Застосування мінеральних добрив також залежить від фінансових спроможностей господарств. Підвищення врожаю і якості сільськогосподарської

продукції також забезпечується проведенням поливу посівів згідно агротехнічним вимогам та своєчасною боротьбою з шкідниками і хворобами сільськогосподарських культур. Об'єктивні (природно-кліматичні) чинники передбачити не можливо і тому їх прогнозування може відбуватися тільки на основі експертних даних. Такі чинники у першу чергу впливають на швидкість та якість процесу фотосинтезу сільськогосподарських культур.

У роботі [9] визначені основні природні (зовнішні) чинники, що впливають процес фотосинтезу рослин, і проведена оцінка його швидкості при нечіткому описі таких чинників. При цьому до зовнішніх чинників у роботі [9] віднесено: інтенсивність світла, що потрапляє на рослини, тобто кількість світла необхідне рослинам для фотосинтезу; температуру навколишнього середовища; концентрація (вміст) вуглекислого газу в атмосфері поблизу рослини; вологість повітря. Крім того, на рівень врожаю впливає природна родючість ґрунту на якому здійснюється сільськогосподарська діяльність. Тому цей чинник також необхідно враховувати під час прийняття рішення про рівень врожаю.

Коротку характеристику природних чинників впливу та індикаторів процесу фотосинтезу розглянуто у [9]. Всі вони мають числові значення і по різному впливають на оцінку рівня врожаю.

При низьких значеннях інтенсивності світла швидкість фотосинтезу невелика і зростає прямо пропорційно з її збільшенням. Однак, при подальшому збільшенні інтенсивності світла наростання швидкості стає все менше і менше, а при значеннях близько 10 000 люкс вона вже не впливає на швидкість фотосинтезу. Освітлення в яскравий літній, сонячний день відповідає 100 000 люкс і в природних умовах висвітлювати рослина сильніше не має сенсу.

Найбільш сприятливою для фотосинтезу вважають температуру 25° С, нижня температурна межа, при якій може здійснюватися фотосинтез, близько 5° С. При підвищенні температури на 10° С інтенсивність фотосинтезу приблизно подвоюється. Але, посилення фотосинтезу відбувається тільки до температури 30-35° С. Подальше підвищення температури призводить до зменшення фотосинтезу, а при 40-45° С він припиняється і при подальшому підвищенні температури знижується.

Вуглекислий газ в сучасній атмосфері має концентрацію в середньому 0,03%. Ефективність фотосинтезу у всіх видів рослин буде зростати з підвищенням концентрації вуглекислого газу від 0,3% до 0,5%. Прийнято вважати, що оптимальна концентрація вуглекислого газу залежить від виду рослин, а її середнє значення становить 0,1%.

При нестачі вологості повітря (8-12%) сповільнюється процес проникнення вуглекислого газу, а це призводить до зменшення швидкості фотосинтезу. Надмірне зволоження також негативно позначається на інтенсивності фотосинтезу, вуглекислий газ не може проникнути всередину листа. Оптимальна величина відносної вологості, необхідної для фотосинтезу, становить 50-80%.

Для оцінки якості і родючості ґрунтів використовують бонітеровку. Бонітет ґрунтів – показник їх якості, виражений у балах по відношенню до ґрунту з найбільш високою потенційною родючістю, бал якої приймається звичайно рівним 100 [10]. Родючість орних земель оцінюється в 25-35 балів.

Також для оцінки рівня врожаю доцільно визначати індикатори поточного стану посівів (спеціальні числові показники), які дозволяють оперативного контролювати процес фотосинтезу рослин. До таких індикаторів у роботі [9] віднесено: індекс NDVI та фрактальну розмірність.

З великої кількості вегетаційних індексів [6] найбільше розповсюдження отримав нормалізований вегетаційний індекс NDVI, який змінюється в межах від -1 до 1. Негативні значення відповідають водним поверхням, будівлям, горам і т. д. Для відкритого ґрунту значення індексу змінюються від 0,1 до 0,2, а для рослинності – завжди від 0,2 до 1. Як правило, значення від 0,2 до 0,4 відповідають території з розрідженою рослинністю, для помірної рослинності – від 0,4 до 0,6, для густої – вище 0,6. У роботі [3] наведено, що під час обробки цифрових зображень посівів кукурудзи середні індекси NDVI склали: станом на 16.06.2018 – NDVI = 0,688, станом на 09.07.2018 – NDVI = 0,770, станом на 29.07.2018 – NDVI = 0,662.

Фрактальна розмірність є дробовою величиною, яка характеризує складність (порізаність) форми, яка заповнює простір. При аналізі цифрових зображень фрактальна розмірність (D) змінюється в межах від 2,0 до 3,0. В роботі [4] показано, що при обробці цифрових зображень посівів кукурудзи для «вікна» розміром 16x16 пікселів середні значення фрактальних розмірностей дорівнюють: $D = 2,922$ (станом на 16.06.2018), $D = 2,946$ (станом на 09.07.2018), $D = 2,910$ (станом на 29.07.2018).

Таким чином, на рівень врожаю впливає сукупність чинників, як суб'єктивних, так і об'єктивних. Також всі розглянуті чинники та індикатори можуть мати різні величини, які змінюються у часі, і впливати на рівень врожай як позитивно, так і негативно. При цьому чинники доповнюють один одного і нелінійно впливають на рівень врожаю. Крім того, статистичні дані про чинники впливу та індикатори стану посівів є обмеженими. Тому в умовах апріорної невизначеності, прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур доцільно здійснювати на основі проведення експертизи з використанням нечітких множин і обробки експертних даних.

Підхід до формалізації поняття нечіткої множини полягає в узагальненні поняття приналежності [11]. Нечіткі множини є природним узагальненням звичайних множин, при відмові від бінарного характеру цієї функції і припущенні, що вона може приймати будь-які значення на відрізьку від 0 до 1. В теорії нечітких множин характеристична функція називається функцією приналежності, а її значення $\mu_A(x)$ – ступенем приналежності елемента x нечіткій множині A . Підхід до проведення експертизи в умовах нечіткої постановки завдання і обробки отриманих даних описаний в [12].

Подальший етап роботи методу спрямований на визначення функцій приналежності чинників впливу та індикаторів поточного стану посівів.

Як зазначалося вище, біологічні та організаційно-техногенні чинники, тобто суб'єктивні чинники, під час прийняття рішення будемо вважати якісними чинниками і оцінювати за допомогою лінгвістичних змінних. Це обумовлено тим, що вони залежать від діяльності людини, і не є випадковими, вони можуть або виконуватися, або не виконуватися, або виконуватися частково. Але не враховувати їх під час прийняття рішення необхідно, тому що вони значно впливають на рівень врожаю. На основі експертних даних будуть прийматися рішення про ступень виконання цих чинників, але рішення буде прийматися не за окремими біологічними та організаційно-техногенними чинниками, а за комплексним їх виконанням.

Згідно [11, 12] під лінгвістичною змінною розуміють кортеж

$$\langle \beta, T(\beta), G, M \rangle,$$

де β – назва лінгвістичної змінної; $T(\beta)$ – термножина лінгвістичної змінної, елементи якої γ_i , $i = 1, \dots, n$, є назвою нечіткої змінної; G – синтаксичне правило, яке породжує назву нечіткої змінної $\gamma \in T(\beta)$, як вербальних значень лінгвістичної змінної; M – синтаксичне правило, яке ставить у відповідність кожній нечіткій змінній $\gamma \in T(\beta)$ нечітку підмножину $A(\gamma) = \{\mu_{A(\gamma)}(x)/x\}$, $x \in X$, $\mu_{A(\gamma)}(x)$ – значення функції приналежності нечіткої підмножини $A(\gamma)$, X – область визначення нечіткої змінної.

Відносно нечіткого показника «біологічні чинники» може бути визначена лінгвістична змінна β_δ – «виконання», а термножина $T(\beta_\delta)$ може визначатися двома нечіткими змінними: $\gamma_{\delta 1}$ – «виконуються» та $\gamma_{\delta 2}$ – «не виконуються». Для нечіткого показника «організаційно-техногенні чинники» також може бути визначена лінгвістична змінна β_{om} – «виконання», а термножина $T(\beta_{om})$ також може визначатися двома нечіткими змінними: $\gamma_{om 1}$ – «виконуються» та $\gamma_{om 2}$ – «не виконуються».

Визначення функцій приналежностей нечітких змінних $\gamma_{\delta 1}$, $\gamma_{\delta 2}$ лінгвістичної змінної β_δ та нечітких змінних $\gamma_{om 1}$, $\gamma_{om 2}$ лінгвістичної змінної β_{om} досягається шляхом постановки експертизи та обробки експертних даних. Кожний i -й експерт, $i = 1, \dots, I$, висловлює своє суб'єктивне судження про таке: у скільки разів значення функції належності $\mu_{A(\gamma_{\delta 1})}(x_n)$, наприклад, розглядається нечітка підмножина $A(\gamma_{\delta 1})$ нечіткої змінної $\gamma_{\delta 1}$ більше значення функції приналежності $\mu_{A(\gamma_{\delta 1})}(x_m)$ $x_n, x_m \in X$; $n = 1, \dots, N$, $m = 1, \dots, M$, X – область визначення лінгвістичної змінної β_δ . Таке судження експерт подає, виходячи із дев'ятибальної шкали оцінок, яку наведено у [12].

При визначенні значень функції приналежності експерти керуються думкою: у скільки разів обраний чинник впливу і індикатор стану посівів більш істотний (вагоміший) по відношенню до іншого чинника впливу та індикатора з точки зору можливості оцінки рівня врожаю. При цьому, якщо n -ий і m -ий чинники впливу або індикатори (A_n і A_m) немає сенсу порівнювати, тобто вони не порівнювані, то оцінка за якісною шкалою дорівнює 0. За умови, що

n -ий і m -ий чинники або індикатори однаково важливі, то оцінка дорівнює 1. У разі якщо експерт вважає, що n -ий чинник або індикатор незначно важливіший, ніж m -ий, то оцінка дорівнює 3. Якщо ж n -ий чинник або індикатор просто важливіше m -го – оцінці присвоюється значення 5. У разі, коли n -ий чинник або індикатор значно важливіший m -го – оцінка має значення 7. Експерт присвоює оцінці значення 9, якщо він вважає, що n -ий чинник або індикатор за своєю значимістю абсолютно перевершує m -ий. Для зворотного порівняння m -го чинника або індикатора з n -им (A_m і A_n) експерт використовує зворотні величини: 1, 1/3, ..., 1/9. Значення оцінок 2, 4, 6, 8 та їх зворотні величини використовуються для полегшення компромісів між судженнями, які відрізняються незначно.

Графічне представлення функцій приналежності нечітких підмножин, які відповідають зазначеним лінгвістичним змінним, наведено на рис. 2.

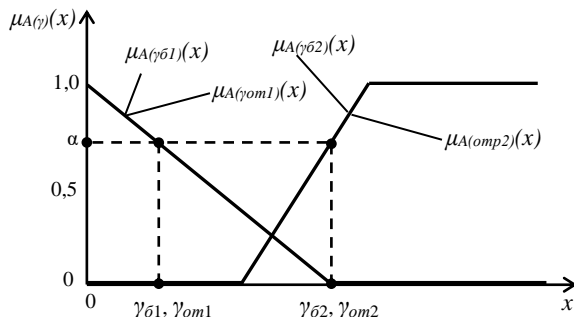


Рис. 2. Функція приналежності лінгвістичних змінних $\gamma_{\beta 1}$, $\gamma_{\beta 2}$ і $\gamma_{\text{om}1}$, $\gamma_{\text{om}2}$

На рис. 2 видно, що функції приналежності двох лінгвістичних змінних однаково і мають декілька характерних областей, на яких експерти приймають відповідні рушення. Так для використання експертами функцій приналежності нечітких змінних на них визначається рівень α , якому будуть відповідати чіткі множини. Виходячи зі змісту чинників впливу, експерт вибирає $\alpha \geq \alpha_{\text{нд}}$, де $\alpha_{\text{нд}}$ – рівень необхідної довіри прогнозованих значень чинників впливу на рівень врожаю, наприклад, $\alpha_{\text{нд}}$ може обраний 0,6. Якщо експерт вибирає значення функції приналежності чинника впливу, які знаходяться на відрізьку від 0 до $\gamma_{\beta 1}$, $\gamma_{\text{om}1}$ та праворуч від $\gamma_{\beta 2}$, $\gamma_{\text{om}2}$, тобто $\alpha_{\text{нд}} > 0,6$, то він визначає чітку α -рівневу підмножину. На відрізьку від $\gamma_{\beta 1}$, $\gamma_{\text{om}1}$ до $\gamma_{\beta 2}$, $\gamma_{\text{om}2}$ експертиза проводиться в умовах нечіткого представлення чинників впливу.

Природно-кліматичні (об’єктивні) чинники мають числові значення і експертиза буда проводиться окремо для кожного чинника впливу. При цьому кожен експерт висловлює свою думку про прогнозовані значення чинників впливу і індикаторів у вигляді нечіткого трикутного числа, функція приналежності якого має вигляд [11]

$$\mu_{A_k}(x) = \begin{cases} [x - (A_k - \Delta_1)] / \Delta_1, & A_k - \Delta_1 \leq x \leq A_k, \\ [(A_k - \Delta_2) - x] / \Delta_2, & A_k \leq x \leq A_k + \Delta_2, \\ 0, & 0 \leq A_k - \Delta_1, x \geq A_k + \Delta_2. \end{cases} \quad (1)$$

Графічне представлення такої функції приналежності нечітких підмножин наведено на рис. 3.

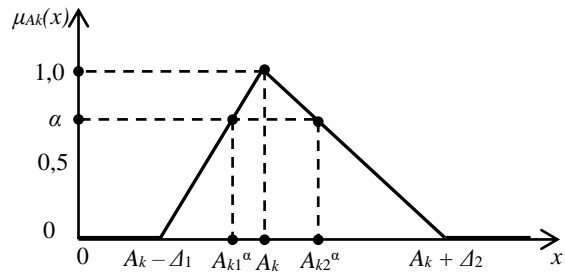


Рис. 3. Представлення значення чинника впливу та індикатора нечітким трикутним числом

Як видно на рис. 3, при виборі функції приналежності у вигляді нечіткого трикутного числа, кожен експерт висловлює свою суб’єктивну думку у вигляді трьох значень про кожен чинник впливу і індикатор стану посівів: від $(A_k - \Delta_1)$ – негативна оцінка (зростаюча ділянка трикутника); A_k – оцінка, найбільш очікувана (вершина трикутника); до $(A_k + \Delta_2)$ – позитивна оцінка (спадаюча ділянка трикутника). Таким чином, кожен експерт свою суб’єктивну думку про прогнозовані значення чинників впливу (інтенсивність світла, що потрапляє на рослини (A_1); температуру навколишнього середовища (A_2); концентрація вуглекислого газу в атмосфері поблизу рослини (A_3); вологість повітря (A_4); природна родючість ґрунту (A_5)), а також індикаторів стану посівів (індекс NDVI (A_6) та фрактальну розмірність (A_7)) висловлює в нечітких оцінках прогнозованих значень.

Аналіз нечіткого прогнозованого опису значень чинників впливу на рівень врожаю показує, що чинники $A_1 - A_5$ мають чітко виражену кількісну природу і вимірюються у відповідних величинах (люксах, градусах Цельсія, відсотках і балах). Індикатори стану посівів (A_6 і A_7) також мають кількісний нечіткий прогнозований опис – індекс NDVI може змінюватися від 0 до 1, а фрактальна розмірність від 2 до 3. Чинники, які мають якісну природу (біологічні чинники (A_8) та організаційно-техногенні чинники (A_9)), прогнозуються на підставі введення до розгляду відповідних лінгвістичних змінних.

На наступному етапі роботи методу, з використанням апріорної інформації про основні чинники та індикатори, експерти проводять попарне (бінарні) порівняння важливості чинників впливу та індикаторів стану посівів ($A_1 - A_9$) на рівень врожаю. При цьому, якщо один чинник або індикатор оцінюється в s разів вагомніше, ніж інший, то другий чинник оцінюється в $1/s$ разів вагомніше, ніж перший, і т.д. Як зазначалося вище, s може приймати значення від 1 до 9 (дев’ятибальна шкала). В якості експертів виступатимуть автори роботи.

Коротко розглянемо доводи експертів при обґрунтуванні вагомості чинників впливу та індикаторів стану рослин на оцінку рівня врожаю.

Порівнюючи чинники впливу та індикатори самі з собою, їх вагомість рівна, тому значення A_{11} , A_{22} , A_{33} , A_{44} , A_{55} , A_{66} , A_{77} , A_{88} , A_{99} дорівнюють одини-

ці. Також існують чинники впливу та індикатори, які пов'язані між собою, і, на думку експертів, однаково впливають на оцінку рівня врожаю, тому їх вагомість один відносно одного також дорівнюється одиниці. До таких чинників впливу відносяться: інтенсивність світла і температура (значення A_{12} і A_{21}), що обумовлено фотохімічною і ферментною системами рослин, а також концентрація вуглекислого газу і вологість повітря (значення A_{34} і A_{43}). Крім того, на думку експертів, родючість ґрунту і біологічні та організаційно-техногенні чинники взаємопов'язані між собою і однаково впливають на рівень врожаю (значення A_{58} , A_{59} , A_{89} і A_{85} , A_{95} , A_{98}), тому що на них впливають результати дії людини, а їх значення дорівнюють одиниці. Індикатори є пов'язаними між собою і однаково характеризують стан посівів, тому експерти також вважають їх рівними одиниці (значення A_{67} і A_{76}). Інші фактори, на думку експертів, в різному ступені (важливіше) впливають на оцінку рівня врожаю.

При оцінці рівня врожаю інтенсивність світла значно важливіше концентрації вуглекислого газу, тому що в реальних умовах концентрація вуглекислого газу в повітрі змінюється незначно, а освітленість може значно змінюватися в залежності від погодних умов і часу доби, тому значення A_{13} дорівнює 7, а значення A_{31} відповідно – 1/7. Також інтенсивність світла просто важливіше вологості повітря, так як при хорошій освітленості процес фотосинтезу йде швидше, ніж при високій вологості, але слабкому освітленні. З урахуванням цього значення A_{14} дорівнює 5, а значення A_{41} – 1/5.

При оцінці рівня врожаю, за думкою експертів, температура повітря значно важливіше такого чинника впливу, як концентрація вуглекислого газу і просто важливіше, чим вологість, тому значення A_{32} і A_{42} дорівнюють 7 і 5, відповідно, а значення A_{23} і A_{24} – 1/7 і 1/5. Це обумовлено тим, що при високих температурах процес фотосинтезу рослин збільшується, але під час перевищення температури 25 °C ефективність фотосинтезу перестає зростати, відбувається закривання пор, і рослини починають економити воду. Тому вологість повітря менш важлива, ніж температура. Закриття пор при збільшенні температури не дозволяє вуглекислому газу потрапити в зелені клітини рослини, тому його концентрація в рослині не змінюється і навіть зменшується, тобто при високій температурі спостерігається нестача вуглекислого газу. Природна родючість ґрунту пов'язана з її початковими генетичними особливостями і у ґрунті рослини знаходять усе необхідне для життя – воду, живлення, повітря, які поповнюються з навколишнього середовища, тому концентрація вуглекислого газу в атмосфері, вологість повітря, інтенсивність світла і температура є просто важливішою ніж природна родючість ґрунту (відповідно значення A_{15} , A_{25} , A_{35} і A_{45} дорівнюють 5, а значення A_{51} , A_{52} , A_{53} і A_{54} – 1/5). Також, за думкою експертів, природні чинники (інтенсивність світла, температура навколишнього середовища, концентрація вуглекислого газу в атмосфері, вологість повітря) не значно, але важливіші за біологічні та організаційно-

техногенні чинники. Тому значення A_{18} – A_{48} і A_{19} – A_{49} дорівнюють 2, а значення A_{81} – A_{84} і A_{91} – A_{94} – 1/2.

Індикатори стану рослин, отримані з використанням дистанційних засобів зондування, на думку експертів, є важливішими при оцінці рівня врожаю, ніж природні, біологічні та організаційно-техногенні чинники впливу, хоча вони і дають лише відносні оцінки характеристик стану рослин. Це обумовлено тим, що індикатори дозволяють оперативному отримувати оціночні значення стану рослин і можуть одночасно охоплювати великі площі. Крім того, вони можуть бути отримані швидше і точніше, ніж чинники впливу. Виходячи з цього, індекс NDVI значно важливіший всіх чинників впливу, і значення A_{61} – A_{65} і A_{68} , A_{69} дорівнюють 7, а значення A_{16} – A_{56} і A_{86} , A_{96} – 1/7. Однак, індикатори стану рослин при їх визначенні необхідно калібрувати і врахувати похибки через погодні умови, а також необхідне порівнювання отриманих результатів з даними тестових еталонних ділянок, які враховують сезонні еколого-кліматичні показники на момент отримання даних. Тому фрактальна розмірність просто важливіша всіх чинників впливу, тому значення A_{71} – A_{75} і A_{78} , A_{79} дорівнюють 5, а значення A_{17} – A_{57} і A_{87} , A_{97} – 1/5. Різниця у значеннях важливості індикаторів стану посівів над чинниками впливу також обумовлено, тим, що в даний час існують накопичені бази індексів NDVI для різних рослин, що розвиваються в різних умовах, чого поки немає для фрактальної розмірності.

Результати порівняння за дев'ятибальною шкалою експерти подають у вигляді матриць $A_i = \|a_{nm}(i)\|$, $i = 1, \dots, I$; $n = 1, \dots, N$; $m = 1, \dots, M$. Потім матриці A_i усереднюються $A = \|a_{nm}\|$. Усереднення може проводитися з урахуванням вагових коефіцієнтів експертів, які залежать від їхнього досвіду. Результати проведення експертизи (усереднена матриця), що були розглянуті вище, мають вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 7 & 5 & 1/5 & 7 & 5 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1/7 & 1/5 & 1/5 & 7 & 5 & 2 & 2 \\ 1/7 & 7 & 1 & 1 & 1/5 & 7 & 5 & 2 & 2 \\ 1/5 & 5 & 1 & 1 & 1/5 & 7 & 5 & 2 & 2 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 1 & 7 & 5 & 1 & 1 \\ 1/7 & 1/7 & 1/7 & 1/7 & 1/7 & 1 & 1 & 1/7 & 1/7 \\ 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1 & 1/5 & 1/5 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 7 & 5 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 7 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Якщо отримана матриця A є квадратною, то вирішуючи матричне рівняння

$$AX^T = \lambda X, \quad (2)$$

то можна визначити власні числа λ матриці, як корені характеристичного рівняння

$$A - \lambda E = 0, \quad (3)$$

де E – одинична матриця.

При цьому кожному власному числу λ буде відповідати власний вектор X . Якщо матриця A є невід'ємною, зворотносиметричною та узгодженою,

то рівняння $A - \lambda E = 0$ має один корінь $\lambda = \lambda_{\max} = k$, якому відповідає єдиний власний вектор X .

У разі подання суб'єктивних суджень експертів у вигляді такої матриці, рішення матричного рівняння

$$AX^T = kX \quad (4)$$

буде визначати власний вектор $X = \{\mu_A(x)/x\}$, $x \in X$, а числова міра розбіжності λ_{\max} і k визначатиме числову міру узгодженості суджень експертів.

$$\text{Якщо } \sum_{i=1}^k \mu_A(x_i) = 1, \text{ то}$$

$$\sum_{i=1}^k \mu_A(x_i) / \mu_A(x_j) = 1 / \mu_A(x_j),$$

і, відповідно до рівняння

$$A\mu^T = \lambda_{\max}\mu \quad (5)$$

можна сформувати вектор $\mu = \{\mu_A(x_j)\}$, $j = 1, \dots, k$.

На наступному етапі методу, в результаті рішення матричного рівняння (5), отримуємо власний вектор, який має константи

$$\mu_i = \{0,115; 0,049; 0,065; 0,074; 0,241; 0,020; 0,027; 0,088; 0,088\}.$$

Нормований вектор

Таблиця 1 – Значення чинників впливу та індикаторів стану посівів

Рівень врожаю	Інтенсивність світла, $\times 10^3$, лк	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Концентрація вуглекислого газу, %	Вологість повітря, %	Родючість ґрунту, бал	Індекс NDVI, 0,0 – 1,0	Фрактальна розмірність, 2,0 – 3,0	Біологічні	Організаційно-техногенні
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
PB 1	9 – 11	20 – 30	0,1 – 0,3	60 – 80	25 – 30	0,6 – 0,7	2,91 – 2,95	вик.	не вик.
PB 2	8 – 11	15 – 25	0,1 – 0,2	50 – 70	30 – 35	0,5 – 0,6	2,92 – 2,96	не вик.	вик.
PB 3	7 – 10	10 – 20	0,05 – 0,15	40 – 60	10 – 15	0,5 – 0,6	2,90 – 2,92	не вик.	не вик.
PB 4	7 – 9	25 – 35	0,03 – 0,1	30 – 50	15 – 20	0,6 – 0,7	2,91 – 2,94	вик.	вик.

Як видно з аналізу даних табл. 1, діапазони зміни значень чинників впливу та індикаторів стану посівів всіх чотирьох комбінацій перетинаються, і визначити рівень врожаю тільки з аналізу цих даних стає неможливо. Тому при визначенні рівня врожаю будемо використовувати експертну оцінку про важливість кожного чинника впливу та індикатора стану посівів для кожного з чотирьох рівнів врожаю.

З використанням методу аналізу ієрархій [12], проведемо попарну (бінарну) оцінку переваг прогнозованих рівнів врожаю з точки зору кожного, з розглянутих вище чинників впливу і індикаторів стану посівів, що складає наступний етап методу. Під час оцінки в якості експертів виступатимуть автори роботи. Коротко розглянемо доводи експертів при обґрунтуванні вагомості рівнів врожаю (PB1 – PB4) для кожного чинників впливу та індикаторів стану рослин. Бінарні порівняння експерти проводять, керуючись думкою: як окремо кожен чинник впливу та індикатор стану посівів визначає один з чотирьох прогнозованих рівнів врожаю. При цьому експерти також використовують дев'яти бальну шкалу, яку було описано вище.

$$\mu_i^{H,\alpha} = \mu_i / \sum_{i=1}^9 \mu_i, \quad (6)$$

має вигляд

$$\mu_i^{H,\alpha} = \{0,150; 0,064; 0,085; 0,096; 0,314; 0,026; 0,035; 0,115; 0,115\}.$$

Розрахований вектор $\mu_i^{H,\alpha}$ відповідає прийнятому для всіх чинників впливу та індикаторів стану посівів рівня α функції приналежності. Таким чином, формування власного вектору характеризує важливість кожного чинника впливу або індикатора стану посівів під час оцінки рівня врожаю.

На наступному етапі методу аналізуються діапазони змін величин чинників впливу та індикаторів стану посівів, що визначають рівень врожаю для вибраного регіону вирощування сільськогосподарських культур. Формується декілька наборів чинників впливу та індикаторів стану посівів, які можуть буди під час оцінки рівня врожаю. Для прикладу, у табл. 1 наведено діапазони зміни значень чинників впливу та індикаторів стану посівів для чотирьох різних їх комбінацій при яких буде проводитися оцінка рівня врожаю (PB1 – PB4).

Таким чином, буде прийматися рішення при якій комбінації чинників впливу та індикаторів стану посівів буде найбільший рівень врожаю.

Порівнюючи рівні врожаю самі з собою, їх вагомість рівна, тому значення RV_{11} , RV_{12} , RV_{13} , RV_{14} – RV_{91} , RV_{92} , RV_{93} , RV_{94} дорівнюють одиниці.

При аналізі першого чинника впливу (інтенсивність світла) експерти роблять висновок, що PB1 в різному ступені, але є вагомим, ніж PB2, PB3 і PB4, так як PB1 характеризується найбільшими значеннями інтенсивності світла, тому значення RV_{12} , RV_{13} і RV_{14} мають наступні величини 3, 5 і 7, відповідно, а значення RV_{21} , RV_{31} і RV_{41} – 1/3, 1/5 і 1/7. Також PB2 за цим чинником має незначну важливість в порівнянні з PB3 і просту важливість в порівнянні з PB4, через більш значення верхньої і нижньої межі інтенсивності світла (значення RV_{23} і RV_{24} дорівнюють 3 і 5, відповідно, а значення RV_{32} і RV_{42} – 1/3 і 1/5). Рівень врожаю PB3 за цим чинником не значно важливіший з PB4, тому що у PB3 верхня межа інтенсивності світла не значно, але більша на 1×10^3 лк, і значення $RV_{34} = 2$, а значення $RV_{43} = 1/2$.

Дослідження показують, що рівень врожаю сильно залежить від температури повітря (другий чинник), але найбільш сприятливою для фотосинтезу

вважають температуру 25 °С. У зв'язку з цим РВ1 не значно важливіше РВ4 ($RV_{214} = 3, RV_{241} = 1/3$), просто важливіше РВ2 ($RV_{212} = 5, RV_{221} = 1/5$) і абсолютно важливіше РВ3 ($RV_{213} = 9, RV_{231} = 1/9$). РВ4 за цим чинником є важливішим в порівнянні з РВ2 ($RV_{242} = 5, RV_{224} = 1/5$) і значно важливішим в порівнянні з РВ3 ($RV_{243} = 7, RV_{234} = 1/7$), через те, що процес фотосинтезу відбувається швидше для температур 30-35 °С, ніж при низьких температурах. Також, тому що температура для РВ2 вища і ближча до 25 °С у порівнянні з РВ3, то значення $RV_{223} = 5$, а значення $RV_{232} = 1/5$.

Аналізуючи третій чинник впливу, можна сказати, що концентрація вуглекислого газу РВ1 і РВ2 в різному ступені, але є вагомим, ніж РВ3 і РВ4, тому що ефективність фотосинтезу у всіх видів рослин зростає з підвищенням концентрації вуглекислого газу до 0,5%. У зв'язку з цим, на думку експертів, значення RV_{313} і RV_{323} дорівнюють 5 і 3, відповідно, ($RV_{331} = 1/5, RV_{332} = 1/3$), а значення RV_{314} і RV_{324} дорівнюють 7 і 5, відповідно, ($RV_{341} = 1/7, RV_{342} = 1/5$). Між собою РВ1 і РВ2 за концентрацію вуглекислого газу відрізняються не значно, тому значення RV_{312} дорівнює 2, а значення $RV_{321} = 1/2$. Між собою РВ3 і РВ4 за концентрацію вуглекислого газу відрізняються не значно, тому значення RV_{343} дорівнює 4, а значення $RV_{334} = 1/4$.

За четвертим чинником впливу (вологість повітря) РВ1 і РВ2 в різному ступені, але є більш важливими, ніж РВ3 і РВ4, тому значення RV_{413} і RV_{423} дорівнюють 7 і 5, відповідно, ($RV_{431} = 1/7, RV_{432} = 1/5$), а значення RV_{414} і RV_{424} дорівнюють 9 і 7, відповідно, ($RV_{441} = 1/9, RV_{442} = 1/7$), що обумовлено більш низькими значеннями вологості для РВ3 і РВ4. За цим же чинником РВ1 не значно важливіший у порівнянні з РВ2, тому значення $RV_{412} = 3$, а значення $RV_{421} = 1/3$. РВ3 за вологість повітря важливіше ніж РВ4, тому $RV_{434} = 5$, а $RV_{443} = 1/5$, через менші значення нижньої і верхньої межі вологості для РВ4.

За п'ятим чинником (природна родючість ґрунту) РВ2 є просто важливішим, ніж РВ1, значно важливішим, ніж РВ4, і абсолютно важливішим у порівнянні з РВ3, тому що РВ2 має найбільший бал бонітету ґрунту. Відповідно, за думкою експертів, значення RV_{521} дорівнює 5, $RV_{523} = 9$, і $RV_{524} = 7$, а зворотні величини відповідно дорівнюють $RV_{512} = 1/5, RV_{532} = 1/9$ і $RV_{542} = 1/7$. РВ1 за цим чинником є також значно важливішим, ніж РВ4, і абсолютно важливішим, ніж РВ3, відповідно $RV_{513} = 9$ і $RV_{514} = 7$, а $RV_{531} = 1/9$ і $RV_{541} = 1/7$. РВ4 за родючість ґрунту є просто важливішим, ніж РВ3, тому значення RV_{543} дорівнює 5, а значення $RV_{534} = 1/5$.

Як видно з табл. 1, індекс NDVI (перший індикатор стану посівів), для РВ1 і РВ4, а також РВ2 і РВ3 однакові, тому $RV_{614} = RV_{641} = 1$ і $RV_{623} = RV_{632} = 1$. Але, на думку експертів, за цим індикатором, РВ1 і РВ4 є просто важливішим, ніж РВ2 і РВ3, тому що індекс NDVI для РВ1 і РВ4 будуть більше, ніж РВ2 і РВ3. У зв'язку з цим $RV_{612} = RV_{613} = RV_{642} = RV_{643} = 5$, а $RV_{621} = RV_{631} = RV_{624} = RV_{634} = 1/5$.

Під час аналізу другого індикатора (фрактальної розмірності) експерти вважають, що РВ1 і РВ2 в різному ступені, але є вагомими, ніж РВ3 і РВ4, тому що у них діапазони змін фрактальних розмірностей є більшими. У зв'язку з цим значення $RV_{713} = RV_{723} = 5$ ($RV_{731} = RV_{732} = 1/5$), а значення $RV_{714} = RV_{724} = 3$ ($RV_{741} = RV_{742} = 1/3$). Діапазони змін фрактальних розмірностей для РВ1 і РВ2 не відрізняються, тому значення $RV_{712} = RV_{721} = 1$. Для РВ4 діапазон змін фрактальних розмірностей не значно, але більше ніж для РВ3, тому значення $RV_{743} = 4$, а значення $RV_{734} = 1/4$.

Як видно з табл. 1, біологічні чинники (перший лінгвістичний чинник) виконуються для РВ1 і РВ4 та не виконуються для РВ2 і РВ3, тому $RV_{814} = RV_{841} = 1$ і $RV_{823} = RV_{832} = 1$. Виконання біологічних чинників, на думку експертів, є абсолютно важливим, ніж їх не виконання, тому $RV_{812} = RV_{813} = RV_{842} = RV_{843} = 9$, а $RV_{821} = RV_{831} = RV_{824} = RV_{834} = 1/9$.

Таку ж думку експерти висловлюють і для організаційно-техногенних чинників (другий лінгвістичний чинник). У зв'язку з тим, що для РВ2 і РВ4 організаційно-техногенних чинники виконуються, а для РВ1 і РВ3 не виконуються (див. табл. 1), то $RV_{924} = RV_{942} = 1$ і $RV_{913} = RV_{931} = 1$. Також, на думку експертів, виконання організаційно-техногенних чинників, є абсолютно важливим, ніж їх не виконання, тому

$$RV_{921} = RV_{923} = RV_{941} = RV_{943} = 9,$$

$$RV_{912} = RV_{932} = RV_{914} = RV_{934} = 1/9.$$

Результати експертизи після усереднення представляються у вигляді квадратних матриць RVJ , де $J = 1, \dots, 9$, для розглянутих вище умов

$$RV1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}, \quad RV2 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 & 3 \\ 1/5 & 1 & 5 & 1/5 \\ 1/9 & 1/5 & 1 & 1/7 \\ 1/3 & 5 & 7 & 1 \end{pmatrix},$$

$$RV3 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 4 \\ 1/7 & 1/5 & 1/4 & 1 \end{pmatrix}, \quad RV4 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 7 & 9 \\ 1/3 & 1 & 5 & 7 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 5 \\ 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1 \end{pmatrix},$$

$$RV5 = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 9 & 7 \\ 5 & 1 & 9 & 7 \\ 1/9 & 1/9 & 1 & 1/5 \\ 1/7 & 1/7 & 5 & 1 \end{pmatrix}, \quad RV6 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 5 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/5 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/5 \\ 1 & 5 & 5 & 1 \end{pmatrix},$$

$$RV7 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 & 3 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/4 \\ 1/3 & 1/3 & 4 & 1 \end{pmatrix},$$

$$RV8 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 9 & 1 \\ 1/9 & 1 & 1 & 1/9 \\ 1/9 & 1 & 1 & 1/9 \\ 1 & 9 & 9 & 1 \end{pmatrix}, \quad RV9 = \begin{pmatrix} 1 & 1/9 & 1 & 1/9 \\ 9 & 1 & 9 & 1 \\ 1 & 1/9 & 1 & 1/9 \\ 9 & 1 & 9 & 1 \end{pmatrix}.$$

Після вирішення матричних рівнянь

$$RVJ\lambda^T = \lambda_j X$$

визначаються власні числа λ_j матриць і формуються власні вектори μ_j . Після нормування

$$\mu_j^{n,\alpha} = \mu_j / \sum_{i=1}^4 \mu_j, \quad (7)$$

нормовані вектора, які характеризують важливість кожного чинника та індикатора під час оцінки рівня врожаю, мають вигляд

$$\mu_1^{n,\alpha} = \{0,603; 0,223; 0,106; 0,068\};$$

$$\mu_2^{n,\alpha} = \{0,626; 0,092; 0,046; 0,237\};$$

$$\mu_3^{n,\alpha} = \{0,547; 0,285; 0,109; 0,059\};$$

$$\mu_4^{n,\alpha} = \{0,642; 0,234; 0,077; 0,046\};$$

$$\mu_5^{n,\alpha} = \{0,167; 0,720; 0,044; 0,069\};$$

$$\mu_6^{n,\alpha} = \{0,417; 0,083; 0,083; 0,417\};$$

$$\mu_7^{n,\alpha} = \{0,363; 0,363; 0,062; 0,212\};$$

$$\mu_8^{n,\alpha} = \{0,450; 0,050; 0,050; 0,450\};$$

$$\mu_9^{n,\alpha} = \{0,050; 0,450; 0,050; 0,450\}.$$

Таким чином, сформовані нормовані вектора характеризують важливість кожного чинника впливу та індикатора впливу для чотирьох умов (табл. 1) для яких оцінюється рівень врожаю.

На останньому етапі методу отримуються узгалянені показники рівня врожаю сільськогосподарських культур, під час якого реалізується принцип синтезу.

Згідно цього принципу, компонента вектору пріоритетів рівня врожаю визначається з використанням виразу

$$\mu_k^{n,\alpha} = \sum_{i=1}^9 \mu_{i,k}^{n,\alpha} \cdot \mu_i^{n,\alpha}, \quad (8)$$

де $k = 1, 2, 3, 4$ – номер рівня врожаю;

$\mu_{i,k}^{n,\alpha}$ – нормоване значення k -ої компоненти вектору пріоритету рівня врожаю за i -им чинником впливу або індикатором стану посівів, значення якого визначено α -рівневим чітким інтервалом функції приналежності;

$\mu_i^{n,\alpha}$ – нормоване значення i -ої компоненти вектору пріоритетів чинників впливу та індикаторів стану посівів, за якими приймається рішення про рівень врожаю, і значення яких визначено α -рівневим інтервалом.

Для підрахунку компоненти $\mu_k^{n,\alpha}$ дані сформованих нормованих векторів зручно представити в наступному вигляді

$$\mu_i^{n,\alpha} = \{0,150; 0,064; 0,085; 0,096; 0,314; 0,026; 0,035; 0,115; 0,115\};$$

$$\mu_{i,1n,\alpha} = \{0,603; 0,626; 0,547; 0,642; 0,167; 0,417; 0,363; 0,450; 0,050\};$$

$$\mu_{i,2}^{n,\alpha} = \{0,223; 0,092; 0,285; 0,234; 0,720; 0,083; 0,363; 0,050; 0,450\};$$

$$\mu_{i,3}^{n,\alpha} = \{0,106; 0,046; 0,109; 0,077; 0,044; 0,083; 0,062; 0,050; 0,050\};$$

$$\mu_{i,4}^{n,\alpha} = \{0,068; 0,237; 0,059; 0,046; 0,069; 0,417; 0,212; 0,450; 0,450\}.$$

За допомогою отриманих нормованих векторів і виразу (8) формується вектор пріоритетів рівня врожаю, який має вигляд

$$\mu_k^{n,\alpha} = \{0,372; 0,384; 0,065; 0,178\}.$$

Аналіз отриманого вектору пріоритетів показує, що найбільший рівень врожаю прогнозується для чисельних значень чинників впливу та індикаторів стану посівів, наведених у другому рядку табл. 1, – PB2. Близький до цього рівня врожаю прогнозується PB1 (чисельні значення чинників впливу і індикаторів представлено у першому рядку табл. 1), тому що він має незначно менше (на 0,012) значення у векторі пріоритетів. Найнижче значення прогнозованого рівня врожаю отримано для умов, представлених у третьому рядку табл. 1 (PB3), що свідчить про те, що зазначені в ньому чинники впливу та індикатори стану посівів не сприяють задовільному розвитку сільськогосподарських культур. Умови для PB4 (четвертий рядок в табл. 1) показують, що вони забезпечують нижчий у два рази прогнозований рівень врожаю у порівнянні з PB2 і PB1.

Таким чином, за результатами роботи розробленого методу приймається рішення, що найбільший рівень врожаю буде для умов, представлених у другому рядку табл. 1: інтенсивність світла – $(8 - 11) \times 10^3$ лк; температура повітря – $15 - 25^\circ\text{C}$; концентрація вуглекислого газу – $0,1 - 0,2\%$; вологість повітря – $50 - 70\%$; родючість ґрунту – $30 - 35$ балів; індекс NDVI – $0,5 - 0,6$; фрактальна розмірність – $2,92 - 2,96$; біологічні чинники – не виконуються, а організаційно-техногенні – виконуються.

Висновки

В умовах нестохастичної невизначеності чинників впливу та індикаторів стану посівів, оцінка рівня врожаю може відбуватися тільки на основі експертних даних, при цьому експертиза може розглядатися в нечіткій постановці.

Розроблено метод прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткого опису чинників впливу та індикаторів стану посівів. Під час розробки методу здійснювалася декомпозиція проблеми в ієрархію, яка мала три стадії. На першій стадії була сформована мета, яка досягається при вирішенні проблеми, – оцінка рівня врожаю. На другій стадії визначені, проаналізовані і описані чинники впливу та індекси стану посівів, за якими приймається рішення про рівень врожаю. На третій стадії визначений перелік альтернатив – рівнів врожаю (PB1 – PB4), які прогнозуються.

Особливістю запропонованого методу є те, що нечіткий опис може застосовуватися для чинників впливу, що визначаються, як кількісно, так і якісно. На основі такого опису за відомими наборами значень чинників впливу з урахуванням індексу NDVI і фрактальної розмірності (на практиці всі ці значення перетинаються) приймається рішення про рівень врожаю.

З використанням розробленого методу визначені величини (ступені) рівнів врожаю для чотирьох різних наборів значень чинників впливу та індикаторів стану посівів. Показано, як нечіткі значення чинників та індикаторів у різному ступені впливають на оцінку рівня врожаю.

Отримані за допомогою розробленого методу результати дозволяють аналізувати як різні набори

значень чинників впливу та індикаторів стану посівів змінюють прогнозований рівень врожаю сільськогосподарських культур.

Під час подальших досліджень доцільно оцінити вплив окремих біологічних та організаційно-техногенних чинників на рівень врожаю, а також застосування розробленого методу для конкретних сільськогосподарських культур.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Якушев, В.П. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства [Текст] / Якушев В.П., Дубенко Н.Н., Лурия Е.А // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: Институт космических исследований РАН. – 2019. – Вып. 16(3). – С. 11-23. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
2. Remote Sensing and Cropping Practices: A Review [Text] / A. Bégué, D. Arvor, B. Bellon, J. Betbeder, D. de Abelleira, R. P. D. Ferraz, V. Lebourgeois, C. Lelong, M. Simões, S. R. Verón // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, Iss. 1. – P. 1-32. doi: 10.3390/rs10010103.
3. Марюшко, М.В. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків SENTINEL-2 [Текст] / Марюшко М.В., Пащенко Р.Е., Коблюк Н.С. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2019. – №1(89). – С. 99 – 108. doi: 10.32620/reks.2019.1.11
4. Марюшко, М.В. Фрактальний аналіз космічних знімків SENTINEL-2 для моніторингу сільськогосподарських культур [Текст] / Марюшко М.В., Пащенко Р.Е. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Харків: РЕКС, 2020. Вип. 4(96). С. 34-47. doi: 10.32620/reks.2020.4.03.
5. Слободяник, М.П. Прогнозування врожайності сільськогосподарських культур за матеріалами ДЗЗ та вегетаційними індексами [Текст] / М.П. Слободяник // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 6 (93). – С. 16 – 20.
6. Черепанов, А.С. Вегетационные индексы [Текст] / А.С. Черепанов // ГЕОМАТИКА. – 2011. – № 2 (11). – С. 98–102.
7. Факторы, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур в условиях Новгородской области [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://apk.novreg.ru/factory-vliyayushchie-na-urozhaynost-sel-skokhozyaystvennykh-kul-tur-v-usloviyakh-novgorodskoy-oblasti.html> – 25.09.2021 p.
8. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Саати Т., Кернс К. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
9. Пащенко, Р.Е. Оцінка швидкості процесу фотосинтезу рослин при нечіткому описі факторів впливу та індикаторів [Текст] / Пащенко Р.Е., Марюшко М.В. // Сучасні інформаційні системи. – 2021. – том. 5, № 3. – С. 31 – 39. doi: 10.20998/2522-9052.2021.3.05.
10. Подхватилина, С.С. Зависимость урожайности сельскохозяйственных культур в республике Беларусь от влияния природных и антропогенных факторов [Текст] / Подхватилина С.С. // Бухгалтерский учет и анализ. – 2015. – №6. – С. 23 – 27.
11. Ягер, Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения [Текст] / Ягер Р.Р. – М.: Радио и связь, 1986. – 405 с.
12. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий [Текст] / Саати Т. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.

Received (Надійшла) 24.05.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.08.2022

Prognostication harvest level of agricultural cultures with the use unclear description of influence factors and plants state indicators

R. Pashchenko, M. Mariushko

Abstract. The **subject** of the study in the article is an estimation possibility of prognostication level of agricultural cultures harvest at unclear description influence factors and special plants state indicators. The **object** of the study is determination of harvest level in set moment of time if the known influence factors and the plants state indicators which turn out with the use of the controlled from distance facilities. The **goal** is consideration method and ground of decision-making, about the harvest level of agricultural cultures if unclear description of factors which influence on their, and plants state indicators. The **tasks**: analysis various monitoring methods of the agricultural cultures state and prognostication of their harvest; determination of influence factors on the harvest level and plants state indicators; consideration possibility of description of influence factors and indicators with the use of fuzzy sets theory; estimation possibility of the use the remote sensing information for the receipt numeral values of influence factors and plants state indicators; development of method prognostication of harvest level agricultural cultures with the use of unclear description influence factors of and plants state indicators; ground of decision-making about a harvest level of agricultural cultures at the set values of influence factors and plants state indicators. **The following results were obtained.** As a result of research unclear description of influence factors and plants state indicators was entered. It is showed that unclear description can be used for influences factors which are determined, both in number and high-quality. On the basis of such description the method of decision-making about a harvest level is developed taking into account the index NDVI and fractal dimension. The results of determination different degrees of harvest level of are resulted for four different sets of values of influence factors and plants state indicators. It is showed, as unclear values of factors and indicators in a different degree influence on the estimation of harvest level. **Conclusions.** The method of prognostication described in this work allows to analyses, as different sets of values of influence factors and plants state indicators change the forecast harvest level of agricultural cultures.

Keywords: Earth remote sensing data, prognostication of harvest level, unclear description of influence factors, index NDVI, fractal dimension.

Б. М. Резанов

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

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ЗМЕНШЕННЯ ЗАТРИМКИ МІКРОПОТОКІВ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ІОТ НА ТУМАННІЙ ПЛАТФОРМІ

Анотація. Оскільки Інтернет речей (IoT) стає частиною нашого повсякденного життя, спостерігається швидке зростання числа підключених пристроїв. Усталений підхід, що ґрунтується на технологіях хмарних обчислень, не може забезпечити необхідну якість обслуговування в таких умовах, зокрема у питаннях зменшення часу затримки при передачі даних. Технологія туманних обчислень сьогодні розглядаються як перспективне рішення для обробки великого обсягу критично важливих і чутливих до часу даних. У цій статті розглянуто технологію хмарних обчислень, а також проведено аналіз шляхів зменшення затримки мікропотоків у комп'ютерних системах підтримки іот на туманній платформі. Проаналізовано архітектури туманних платформ підтримки IoT, такі як багаторівнева архітектура, OpenFog, IFCIoT. В результаті аналізу зроблено висновок, що виникла необхідність у створенні методів управління мікропотоків для зменшення затримки мікропотоків даних у комп'ютерних системах підтримки IoT на туманній платформі за рахунок підвищення ефективності розподілу обчислювальних ресурсів для виконання вимог щодо якості обслуговування

Ключові слова: хмарні обчислення, туманні обчислення, IoT, Fog computing, інтернет речей.

Вступ

У поточних реалізаціях хмарних додатків більшість даних, потребують зберігання, аналізу та прийняття рішень, відправляється до центрів обробки даних у хмарі [1]. По мірі збільшення обсягу даних переміщення інформації між IoT пристроєм і хмарою може бути не ефективним або навіть неможливим в деяких випадках через обмеження пропускної здатності обчислювальної мережі. По мірі появи додатків, чутливих до часу відгуку (таких як автомобілі з автоматичним керуванням, моніторинг пацієнтів, та інше), віддалена хмара не зможе задовольнити потребу цих додатків у забезпеченні наднадійного зв'язку з мінімальною затримкою [2]. Більше того, в деяких програмах надсилання даних у хмару може бути неможливим через проблеми конфіденційності.

Для вирішення проблем додатків, що вимагають високої пропускної спроможності обчислювальної мережі, можливості роботи з географічно розосередженими джерелами даних, наднизькими затримками та забезпеченням локальності обробки даних існує типова потреба в обчислювальній парадигмі, яка б забезпечувала універсальний підхід до організації обчислень як у хмарі, так і на базі обчислювальних вузлів ближче до підключених пристроїв. Концепція туманних обчислень (англ. Fog computing) була запропонована індустрією та науковою спільнотою для усунення розриву між хмарою та пристроями IoT шляхом надання обчислювальних можливостей, зберігання, організації мережевої взаємодії та керування даними на вузлах мережі, розташованих у безпосередній близькості від пристроїв IoT [3, 4].

Виклад основного матеріалу

Особливості функціонування комп'ютерної системи підтримки IoT на туманній платформі. Туманні обчислення покликані розширити хмарні функції зберігання, обчислення та мережевої взаємодії. Концепція передбачає обробку даних на кінцевих пристроях мережі (комп'ютерах, мобільних

пристроях, датчиках, смарт-вузлах тощо), а не в хмарі, вирішуючи таким чином основні проблеми, що виникають при організації Інтернету речей.

Парадигму туманних обчислень можна розглядати (у широкому значенні) як інструмент для багатьох передових технологій. Можна виділити основні функціональності, що надаються туманними системами:

- швидкий аналіз;
- інтероперабельність між пристроями;
- збільшення чи зменшення часу відгуку;
- централізоване керування пристроями IoT або керування конкретною машиною;
- низьке споживання пропускної спроможності;
- ефективне енергоспоживання;
- абстракція пристрою.

Основні архітектурні відмінності Fog від Cloud:

- забезпечення якості послуг (QoS, Quality of Service), що потребує динамічної адаптації додатків до стану мережі;

- відстеження розташування (Location Awareness) для того, щоб підтримувати стабільність роботи програми в умовах мобільності терміналу;
- слідування контекстної інформації (Context Awareness), тобто. здатність виявляти наявність доступних ресурсів поблизу, щоб задіяти в роботі програми, з можливістю горизонтального взаємодії.

В архітектурі Fog мережні вузли (Fog Sites), розташовані ближче до хмарних дата-центрів, мають більшу обчислювальну потужність і більший обсяг даних у системах зберігання. Мережні вузли, розташовані ближче до сенсорів інтернету речей і мобільних пристроїв, мають більшу інтерактивність і швидкий відгук. Відмінною особливістю Fog є те, що як мережними вузлами можуть виступати пристрої користувача, такі як персональні комп'ютери, домашні шлюзи, телеприставки та мобільні пристрої.

Архітектура туманних платформ підтримки IoT. Архітектура туманних обчислень призводить до мінімізації накладних витрат на передачу даних, згодом покращується продуктивність обчислень на хмарних

платформах та зменшується потреба у обробці та зберіганні великих обсягів надлишкових даних. В основі парадигми туманних обчислень лежить факт постійного збільшення необхідного пристроям Інтернету речей (IoT) обсягу інформації, причому кількість інформації (за обсягом, розмаїттям і швидкістю) також зростає через кількість пристроїв, що постійно розширюється.

Багаторівнева архітектура туману. Дослідники представили багаторівневу архітектуру Fog [5], де було показано шість різних верств (рис. 1). Фізичні та віртуальні вузли, а також датчики обслуговуються відповідно до вимог нижніх рівнів, відомих як фізичний рівень та рівень віртуалізації. Наступний верхній рівень – це рівень моніторингу, який відстежує діяльність мережі та базового вузла. Цей рівень визначає, коли і яке завдання має бути виконане якимось вузлом. Цей рівень контролює споживання енергії для пристроїв або вузлів з обмеженнями. Над рівнем моніторингу розташований рівень попередньої обробки, який виконує пов'язані з керуванням даними завдання для отримання необхідних та більш значущих даних. Після цього дані тимчасово зберігаються у ресурсах туману на наступному верхньому рівні, відомому як рівень тимчасового зберігання. Найвищий - транспортний рівень завантажує попередньо оброблені та захищені дані у хмару. Таким чином, більшість обробки буде виконуватися в середовищі туману і дозволить хмарі мати справу з більш складними службами. Як тільки оброблені дані завантажуються у хмару, вони видаляються з локального носія даних. Для приватних даних рівень безпеки забезпечується конфіденційністю, шифруванням та цілісністю відповідних послуг.

Фізичний рівень
Рівень віртуалізації
Рівень моніторингу
Рівень попередньої обробки
Рівень тимчасового зберігання
Транспортний рівень

Рис. 1. Архітектура туманних обчислень

У роботі [6] було запропоновано чотири рівні архітектури туману:

- рівень генерування даних;
- рівень хмарних обчислень;
- рівень туманних обчислень;
- рівень споживача даних.

Їхнє графічне уявлення зображено на рис. 2. На рівні споживачів даних розглядається широке коло споживачів - від приватних осіб до підприємств. Споживачі можуть надсилати свої запити на три інші рівні та отримувати необхідні послуги. Рівень генератора даних – це те місце, де знаходяться IoT-системи, які зв'язуються із шаром хмарних обчислень через шар туманних обчислювальних.

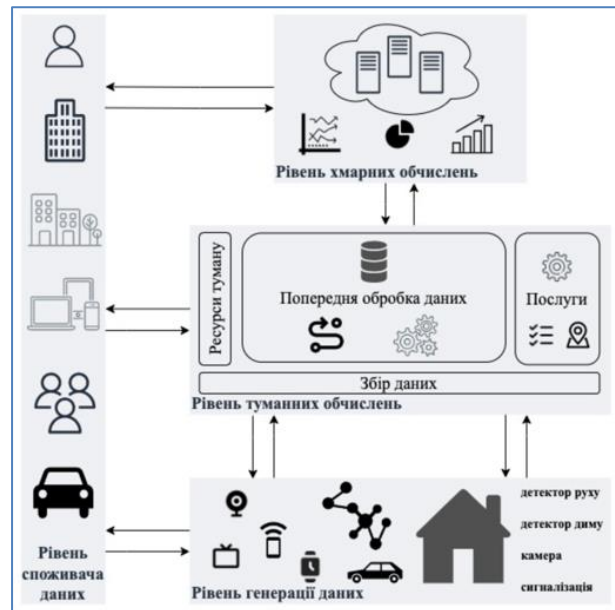


Рис. 2. Архітектура обчислювальної мережі

У цій архітектурі попередня обробка даних виконуватиметься на рівні Fog. Цей рівень також забезпечує поінформованість про контекст та низьку затримку. Рівень хмарних обчислень забезпечує централізоване керування та широкий спектр послуг моніторингу. Ключовою відмінністю цієї архітектури від інших вищеописаних є прямиий зв'язок між споживачами та всіма трьома шарами

Шар туману представлений як проміжний шар між мобільними пристроями та хмарою в архітектурі системи туману Луана TX. та співавторів [7] (рис. 3).

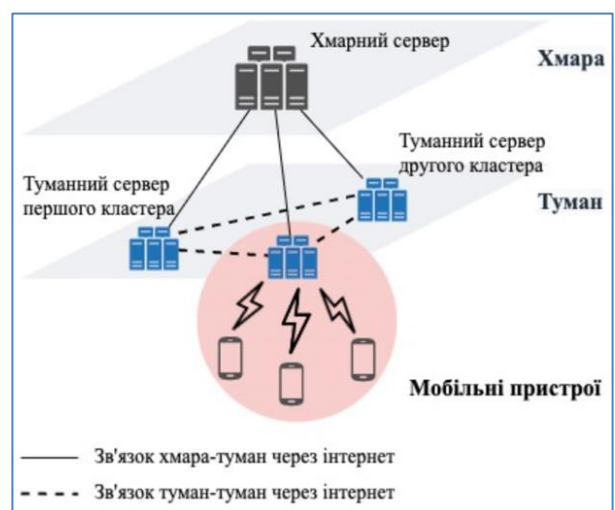


Рис. 3. Архітектура обчислювальної мережі мобільних пристроїв

Згідно з цією архітектурою, основним компонентом шару туману є сервер туману, який має бути розгорнутий у фіксованому місці на локальних майданчиках мобільних користувачів. Туманний сервер може бути існуючим мережним компонентом, таким як базова станція або точка доступу Wi-Fi. Ці сервери взаємодіють із мобільними пристроями через бездротові з'єднання і надають їм попередньо визначені служби

додатків у своєму бездротовому покритті, не звертаючись за допомогою до хмари або інших серверів туману. Ця системна архітектура не враховує багатьох інших аспектів, але розкриває ідею сервера туману. Дастджерді та співавтори у [8] представили п'ятирівневу еталонну архітектуру туманних обчислень (рис. 4). Найвищий – це рівень програм IoT, який надає кінцевим користувачам можливості цих програм. Наступний рівень – це програмно-визначуваний рівень управління ресурсами, який займається питаннями моніторингу, забезпечення, безпеки та управління. За ним іде рівень, який відповідає за управління хмарними службами та ресурсами.

Далі – мережний рівень, який підтримує зв'язок між усіма пристроями та хмарою. Найнижчий рівень складається з кінцевих пристроїв, таких як датчики, граничні пристрої та шлюзи. Він включає деякі додатки. Вони працюють, покращуючи функціональність пристрою. У цій еталонній архітектурі шар туману повністю відсутній, і він також не свідчить про те, де виконується обчислення

Архітектура OpenFog. Пояснення архітектури OpenFog є найповнішим. Воно було дано в науковій роботі OpenFog Architecture Overview групи дослідників Group OSAW5. В OpenFog розглянуто основні характеристики туманних обчислень. Однак ця архітектура не враховує можливості зберігання даних поряд із кінцевими користувачами. Вона призначена для виконання обчислень безпосередньо поблизу клієнта, щоб мінімізувати затримку, витрати на передачу та інші пов'язані з мережею умови поряд з вимогами до пропускної спроможності. Елементи керування, включаючи можливість конфігурації та контроль доступу, а також мережні вимірювання, розгортаються поблизу кінцевої точки, а не керуються зі шлюзу. Крім того, запропонована архітектура дозволяє здійснювати збирання та обробку даних з використанням локальної аналітики, а результати безпечно копіюються в хмару для подальшої обробки та використання. Склад і конфігурація рівнів даної архітектури схематично зображені на рис. 5.

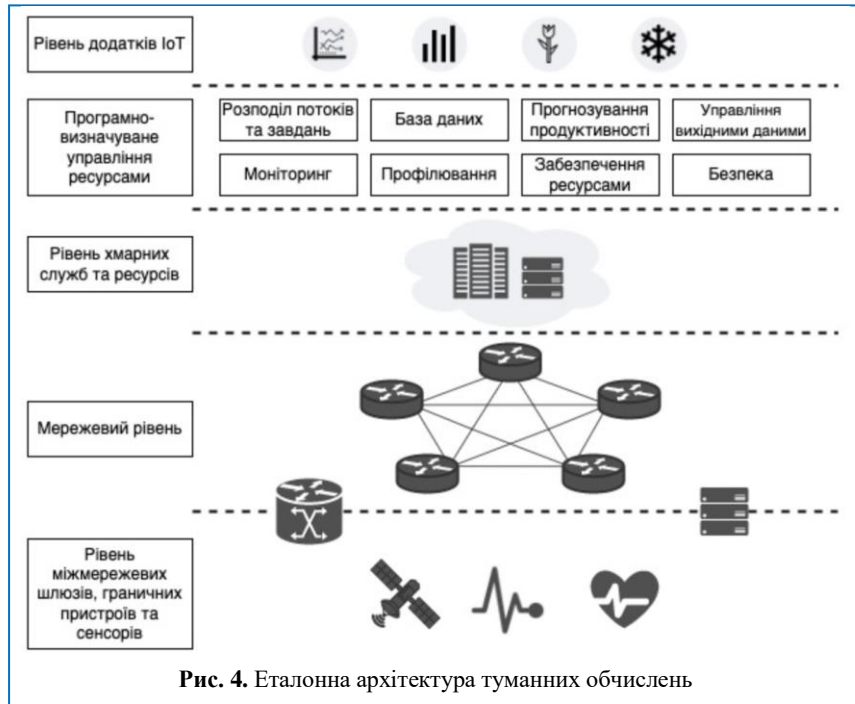


Рис. 4. Еталонна архітектура туманних обчислень

Архітектура IFCIoT. Інтегрована архітектура IoT-хмари або туману (IFCIoT) була запропонована Муніром та співавторами у [9]. Ця архітектура дозволяє використовувати інтегровані хмарні служби для пристроїв Інтернету через проміжну інфраструктуру fog. Об'єднана хмара формується кількома зовнішніми та внутрішніми хмарними серверами, які відповідають потребам додатків та бізнесу. Шлюзові пристрої, інтелектуальні маршрутизатори, прикордонні сервери та базові станції є вузлами туману, і більшість обробки відбувається у них. Вузли туману автономні; таким чином кожен вузол може забезпечити безперервне обслуговування своїх постачальників даних. Все розгортання обчислювального середовища fog може бути локальним у разі автоматизації окремих офісних будівель, а також може бути розподілено на регіональному рівні, включаючи локальні рівні у разі великих комерційних компаній, розта-



Рис. 5. Відкрита архітектура туманних обчислень[10]

шованих у кількох будинках у різних місцях. Ця архітектура підтримує розподілене розгортання та передачу інформації з різних рівнів до централізованої системи. Підключення всіх пристроїв IoT вважається бездротовим підключенням через WLAN, WiMAX та інші мережі. Туманні вузли підтримують з'єднання з пристроями IoT у межах бездротового діапазону. Весь туман підключений до інтегрованої служби хмари через основну мережу. Для спільної обробки система туману може бути підключена до інших туманів бездротової мережі.

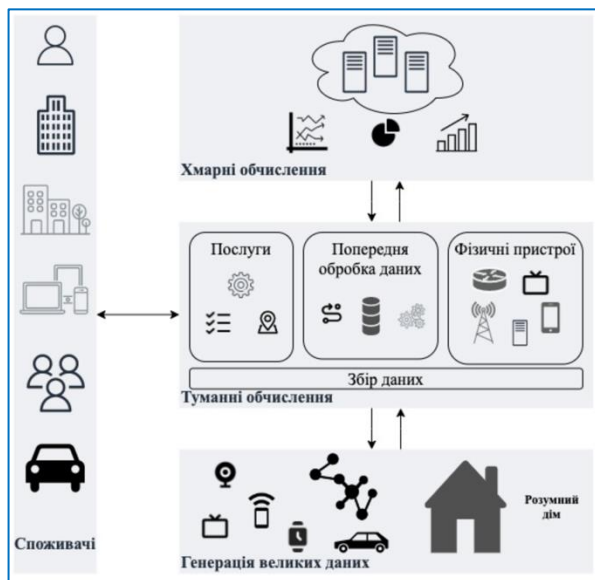


Рис. 6. Архітектура IFCIoT

З рис. 6 видно, що ця архітектура схожа за складом на архітектуру, запропоновану Аркіан і співавторами [6]. Головною відмінністю останньої від IFCIoT є те, що IFCIoT кінцевий користувач має безпосередній доступ тільки до середовища туманних обчислень, через яку зв'язується з хмарними сервісами і периферійними пристроями-речами.

Аналіз методів підвищення ефективності функціонування комп'ютерних систем підтримки IoT на туманній платформі. Туманні обчислення призначені для розгортання розподіленим способом де обробка виконується прикордонними пристроями. Хмарні обчислення – це централізована концепція. У тумані пристрої обробки та зберігання даних розташовані в безпосередній близькості порівняно з хмарою, і це є причиною того, що туман більш здатний забезпечувати надання послуг з низькою затримкою (з урахуванням затримки через точки доступу, смартфони, базові станції, комутатори, сервери та маршрутизатори). Крім того, доповнена реальність, потокове відео, ігри та будь-яка інша інтелектуальна система зв'язку також потребують тимчасових обчислень. Шкіра з цих систем генерує великий обсяг даних, який нерентабельно відправляти на хмару для подальшої обробки.

Масштабованість забезпечується динамічною відповідністю технологічних можливостей туманних середовищ бізнес-вимог з урахуванням таких факторів, як робочі навантаження, продуктивність, вартісні показники.

Масштабованість передбачає внесення змін до окремих вузлів мережі шляхом додавання апаратного та програмного забезпечення, збільшення кількості вузлів на особливо завантажених рівнях або на сусідніх з ними або зменшення їх кількості в міру необхідності, а також додавання систем зберігання даних та засобів аналітики.

Це дозволяє нарощувати продуктивність у туманних структурах, змінювати розміри мереж зі збільшенням кількості додатків, «речей» чи кінцевих користувачів, розширювати функціональність засобів забезпечення надійності та безпеки. Крім того, для адекватної підтримки додатками, інфраструктурою управління та оркестрівки величезної кількості підключених до мережі «речей» та об'єктів здійснюється модифікація апаратних конфігурацій компонентів вузлів, а також програмного забезпечення.

Будучи одним із найважливіших принципів моделі FaaS, масштабованість уможливорює «оплату в міру зростання». Особливо це важливо на етапі початкового розгортання хмарних систем, а також для довгострокового успіху «туманних» проєктів.

Автономність визначається здатністю виконання вузлами туманних мереж запропонованих їм функцій в умовах відмов чи відсутності підтримують їх зовнішніх сервісів. В архітектурі OpenFog RA цей принцип поширюється на всі рівні мережевої ієрархії. Наприклад, у разі операційної автономності централізоване прийняття рішень у хмарі не є єдиною можливою опцією. Завдяки автономній реалізації вузлів подібні функції виконуються локальними вузлами на межі мережі на основі даних, що їх обробляють.

Серед інших областей, де автономність потрібна, - визначення та реєстрація об'єктів, що підключаються до мережі, оркестрування, управління, забезпечення безпеки.

Автономність — один із найважливіших факторів підвищення економічної ефективності туманних структур, оскільки завдяки їй витрати на передачу у хмару великих обсягів необроблених даних значно знижуються.

Програмованість, яка повинна підтримуватися і апаратними компонентами, забезпечує високий рівень адаптації додатків, що розгортаються у туманних середовищах. Це дозволяє повністю автоматизувати повторну постановку завдань, які мають виконуватися вузлами туманної мережі чи кластерами, які з кількох вузлів. Такий результат досягається завдяки застосуванню інтерфейсів програмування функцій, що описуються універсальними інтерфейсами обчислювальних чи прискорювальних компонентів.

Програмування забезпечує формування адаптивної інфраструктури, що відповідає вимогам різних сценаріїв розгортання додатків IoT, а також дозволяє оптимізувати використання наявних ресурсів, для чого, серед іншого, застосовується контейнеризація.

У разі реалізації у туманних структурах сервісних моделей програмування дозволяє логічно ізолювати виконавчі середовища різних користувачів. Вона автоматизує оновлення засобів безпеки і дозволяє швидше реагувати на виникаючі загрози.

Принципи формування туманних платформ підтримки IoT та постановка завдання

Туманні обчислення можуть відігравати важливу роль, коли потрібна ефективна обробка та миттєве прийняття рішень. Наприклад, відстеження кількох цілей у відеопотоці. Замість того, щоб відправляти відеопотоки в хмару, він прямує до найближчого вузла туману. Будь-які мобільні пристрої, такі як планшети, смартфони та ноутбуки можуть стати вузлом туману, запускати алгоритми відстеження та обробляти необроблені відеопотоки, що дозволяє скоротити затримку передачі даних із зони спостереження в хмару. Проксимальний алгоритм також може бути реалізований у вузлах туману широкомасштабної служби потокової передачі відео та може вирішити проблему спільного розподілу ресурсів.

Однак не всі вузли туману можуть ефективно впоратися з обробкою тієї чи іншої інформації.

Таким чином виникає необхідність у створенні методів управління мікропотоками для зменшення затримки мікропотоків даних у комп'ютерних системах підтримки IoT на туманній платформі за рахунок

підвищення ефективності розподілу обчислювальних ресурсів для виконання вимог щодо якості обслуговування.

Висновки

У статті проаналізовано особливості функціонування комп'ютерної системи підтримки IoT на туманній платформі, парадигму туманних обчислень, основні архітектурні відмінності туману від хмари.

Проаналізовано архітектури туманних платформ підтримки IoT, такі як багаторівнева архітектура, OpenFog, IFCIoT.

Проаналізовано методи підвищення ефективності функціонування комп'ютерних систем підтримки IoT на туманній платформі.

Зроблено висновок, що виникла необхідність у створенні методів управління мікропотоками для зменшення затримки мікропотоків даних у комп'ютерних системах підтримки IoT на туманній платформі за рахунок підвищення ефективності розподілу обчислювальних ресурсів для виконання вимог щодо якості обслуговування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ravandi B., Papapanagiotou I. A Self-Learning Scheduling in Cloud Software Defined Block Storage *IEEE International Conference on Cloud Computing, CLOUD* (Honolulu, Hawaii, USA, June, 25–July, 1, 2017). IEEE Computer Society, 2017. P. 415–422. DOI: 10.1109/CLOUD.2017.60.
2. Zhang B., Mor N., Kolb J., et al. The Cloud is Not Enough: Saving IoT from the Cloud *7th USENIX Workshop on Hot Topics in Storage and File Systems, HotStorage* 2015, 2020.
3. Bonomi F., Milito R., Zhu J., et al. Fog Computing and Its Role in the Internet of Things *Proceedings of the 1st ACM Mobile Cloud Computing Workshop, MCC'12* (Helsinki, Finland, August, 17, 2012). ACM Press, 2012. P. 13–15. DOI: 10.1145/2342509.2342513.
4. OpenFog Consortium Architecture Working Group OpenFog Reference Architecture for Fog Computing, 2017.
5. Aazam M., Huh E. Fog Computing Micro Datacenter Based Dynamic Resource Estimation and Pricing Model for IoT. *2015 IEEE 29th International Conference on Advanced In-formation Networking and Applications*. Gwangju, 2015. p. 687–694. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/AINA.2015.254>
6. Arkian H.R., Diyanat A., Pourkhalili A. MIST: Fog-based data analytics scheme with cost-efficient resource provisioning for IoT crowdsensing applications. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017; 82:152-165. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.01.012>
7. Luan T.H., Gao L., Li Z., Xiang Y., Wei G., Sun L. Fog Computing: Focusing on Mobile Users at the Edge. *arXiv:1502.01815*. 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1502.01815> (accessed 01.05.2020). (In Eng.)
8. Dastjerdi A.V., Gupta H., Calheiros R.N., Ghosh S.K., Buyya R. Fog computing: Principles, architectures, and applications. In: Buyya R., Dastjerdi A. (ed.) *Internet of Things: Principle & Paradigms*. Morgan Kaufmann, Burlington, Massachusetts, USA; 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1601.02752> (accessed 01.05.2020). (In Eng.)
9. Munir A., Kansakar P., Khan S.U. IFCIoT: Integrated Fog Cloud IoT: A novel architectural paradigm for the future Internet of Things. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2017; 6(3):74-82. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2684981>
10. Kashif Munir and Lawan A. Mohammed, University of Hafr Al Batin, KSA: Biometric Smartcard Authentication for Fog Computing. *International Journal of Network Security and Its Application (IJNSA)* Vol. 10, No 6, November 2018. Available at: <https://airconline.com/abstract/ijnsa/v10n6/10618ijnsa04.html>

Received (Надійшла) 22.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

Analysis of ways to reduce microflow delay in computer systems supporting IoT on the fog platform

Bohdan Rezanov

Abstract. As the Internet of Things (IoT) becomes a part of our daily lives, there is a rapid increase in the number of connected devices. The established approach based on cloud computing technologies cannot provide the required quality of service in such conditions, particularly in reducing the delay time in data transmission. Today, fog computing technology is considered a promising solution for processing a large volume of critical and time-sensitive data. This article examines the technology of cloud computing, and also analyzes ways to reduce the delay of microflows in computer systems supporting IoT on a fog platform. Analyzed architectures of IoT support fog platforms such as multi-layer architecture, OpenFog, and IFCIoT. As a result of the analysis, it was concluded that there was a need to create microflow management methods to reduce the delay of microflows of data in computer systems supporting IoT on a fog platform by increasing the efficiency of the allocation of computing resources to meet the quality of service requirements.

Keywords: Cloud computing, Fog computing, IoT, Internet of Things.

Т. В. Смірнова, Н. М. Якименко, С. А. Смірнов, Л. І. Поліщук, О. А. Смірнов

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО КРИПТОАНАЛІЗУ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ФУНКЦІЇ ГЕШУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МОДУЛЯ КРИПТОГРАФІЧНОГО ЗАХИСТУ В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. Об'єктом дослідження є процес забезпечення конфіденційності даних в інформаційно-комунікаційних системах управління технологічними процесами на базі хмарних технологій. Предметом є дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах. Мета роботи полягає в дослідженні стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах управління технологічними процесами на базі хмарних технологій. У результаті дослідження удосконалено модуль криптографічного захисту інформації, проведено дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах. Проведене експериментальне дослідження підтвердило криптостійкість удосконаленого алгоритму до диференціального криптоаналізу. **Висновки.** Удосконалено модуль криптографічного захисту інформації, який за рахунок фіксування інформації про ідентифікатор користувача, ідентифікатор сесії, час відправлення, довжину повідомлення та його порядковий номер, а також використання нової процедури формування сеансового ключа для шифрування, дозволяє забезпечити конфіденційність і цілісність даних в інформаційно-комунікаційних системах управління технологічними процесами. Для ефективного використання цього модуля важливим є вибір криптостійких методів шифрування та гешування, а також синхронізація секретного ключа. У якості функцій та можуть бути використані криптоалгоритми, стійкі до лінійного, диференціального, алгебраїчного, квантового та інших відомих видів криптоаналізу. Проведено дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах. Проведене експериментальне дослідження підтвердило криптостійкість удосконаленого алгоритму до диференціального криптоаналізу.

Ключові слова: криптоаналіз, гешування, інформаційно-комунікаційні системи, захист інформації.

Вступ

Початок 2022 року в Україні ознаменувався рядом кібератак на хмарні ресурси державних установ. Так під час масованої кібератаки, яка почалася у ніч з 13-го на 14 січня, постраждали 22 сайти органів державної влади. Шести сайтам було завдано значної шкоди, 70 – відключено за вказівкою Держспецзв'язку та Служби безпеки України [1]. Починаючи з другої половини дня 15 лютого 2022 року спостерігалась потужна DDoS-атака на низку інформаційних ресурсів України. Зокрема, було зафіксовано перебої в роботі веб-сервісів Приватбанку та Ощадбанку. Також атаки зазнали сайти Міністерства оборони та Збройних Сил України [2]. Таким чином очевидно, що на сучасному етапі розвитку хмарних технологій, існує завдання захисту даних, які зберігаються у відповідних інформаційно-комунікаційних системах.

Останні події, пов'язані з атаками на різні хмарні сервіси потребують розроблення нових або удосконалення існуючих механізмів захисту інформації. Одним з таких механізмів є програмні модулі криптографічного захисту даних, у яких необхідно реалізувати вибір стійких методів шифрування та гешування, а також синхронізацію секретного ключа. У якості зазначених процедур можуть використовуватись відомі криптографічні методи і засоби, стійкі до лінійного, диференціального, алгебраїчного, квантового та інших відомих видів криптоаналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні серед множини методів захисту інформації особливе місце займають криптографічні методи [3].

У теперішній час в хмарних сервісах використовуються наступні відомі програмні модулі криптографічного захисту даних: MTProto 1.0 [4] – модуль, який використовується для шифрування повідомлень при передаванні клієнтами Telegram; Signal Protocol [5] – використовується для шифрування миттєвих повідомлень Facebook Messenger; TLS Skype [6] – для миттєвих повідомлень використовується TLS (безпека на рівні транспорту) для шифрування повідомлень між клієнтом Skype та службою чату, коли вони надсилаються безпосередньо між двома клієнтами Skype. Проведений порівняльний аналіз розглянутих модулів захисту інформації у сучасних інформаційно-комунікаційних системах та мережах (ІКСМ), за такими критеріями, як використовувані криптоалгоритми, швидкість роботи (ШР), зручність для користувачів (ЗК) і кросплатформеність (КП), показав, що розглянуті програмні модулі мають низку недоліків і можуть бути удосконалені за рахунок використання сучасних процедур безпеки [16]. Зважаючи на зазначене, в роботі [16] був розроблений удосконалений модуль криптографічного захисту інформації для забезпечення конфіденційності та цілісності даних у сучасних ІКСМ. Для використання цього модуля на практиці потрібно визначитись з функціями гешування F_{hash} та шифрування F_{enc} . Удосконалений модуль криптографічного захисту інформації, за рахунок фіксування інформації про ідентифікатор користувача, ідентифікатор сесії, час відправлення, довжину повідомлення та його порядковий номер, а також використання нової процедури формування сеансового ключа для шифрування, дозволяє забезпечити конфіденційність і цілісність

даних в ІКСМ [16]. Для ефективного використання цього модуля важливим є вибір криптостійких методів шифрування F_{enc} та гешування F_{hash} , а також синхронізація секретного ключа $authKey$. У якості функцій F_{enc} та F_{hash} можуть бути використані зокрема й алгоритми, запропоновані авторами у своїх попередніх роботах [8, 10-12, 16], або інші відомі криптоалгоритми [7, 9, 13-15], стійкі до лінійного, диференціального, алгебраїчного, квантового та інших відомих видів криптоаналізу. У подальшому планується зосередити увагу на дослідженнях удосконаленого модуля криптографічного захисту інформації з використанням різних методів шифрування і гешування, зокрема тих, що були запропоновані авторами у своїх попередніх дослідженнях. Областю застосування запропонованих підходів є хмарні системи які описані у [19, 20].

Мета роботи: полягає в дослідженні стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах управління технологічними процесами на базі хмарних технологій.

Теоретичне обґрунтування удосконалення модуля захисту

З огляду на результати проведеного аналізу, прототипом було обрано розглянутий модуль MTPProto Mobile Protocol v.1.0 [4], порівняно з яким було змінено наступне [16]:

1. Змінені вхідні та вихідні дані. На вході приймаються і обробляються наступні дані: повідомлення M , інформацію про ідентифікатор користувача та ідентифікатор сесії S , інформацію про час відправлення і довжину повідомлення ID та порядковий номер повідомлення PD . На виході тільки отримуємо $mHash$ – геш значення DB ($DB = (S, ID, M)$) та $EncP$ – зашифроване повідомлення P [16].

2. Замість використання геш функції SHA-1 введено використання певної криптостійкої геш функції F_{hash} . Слід зауважити, що у якості F_{hash} може бути використана функція гешування, що побудована на основі одного із методів [7-9, 16].

3. Замість використання блокового шифру AES введено використання функції F_{enc} . Слід зауважити, що у якості F_{enc} може бути використаний певний криптостійкий алгоритм шифрування, побудований на основі блокових, потокових шифрів чи геш функцій тощо [10-12, 16].

4. У якості $authKey$, введено використання задалегідь узгодженого секретного ключа користувачів, наприклад за допомогою протоколів асиметричної криптографії [16].

Для використання цього модуля на практиці потрібно визначитись з функціями гешування F_{hash} та шифрування F_{enc} .

Схеми шифрування та дешифрування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах наведені на рис. 1, 2.

У схемах використовуються такі позначення:

- $K_0 \dots K_{t-1}$, – масив розширених ключів;
- i, j, A, B, C і D – тимчасові змінні, їх початкові значення дорівнюють нулю;
- $Ft()$ і $Fu()$ – функції раундового перетворення алгоритму;
- $RC[]$ – перемішування в колонках (RoundColumns);
- $IRC[]$ – зворотнє до $RC[]$ перемішування в колонках (InvRoundColumns);
- *відкритий текст* – блок даних розміром 128 бітів (16 байтів), що підлягає зашифруванню, а також блок даних того ж розміру після розшифрування (розміри відкритого тексту й шифротексту збігаються);
- *шифротекст* – блок даних розміром 128 бітів (16 байтів) після зашифрування, або цей же блок даних, що підлягає розшифруванню (розміри відкритого тексту й шифротексту збігаються);
- *ключ шифрування (секретний ключ, K)* – блок даних розміром 128 бітів (16 байтів), 256 бітів (32 байтів), 512 бітів (64 байтів), що використовується в якості встановлюваного секретного параметра в процедурі зашифрування або розшифрування;
- *процедура розширення підключів* – алгоритм формування із ключа шифрування – підключів, для виконання раундових перетворень;
- *підключ (K_i)* – блок даних розміром 32 біти (4 байта), що отриманий із ключа шифрування в результаті виконання процедури розширення підключів;
- *раунд* – інтерактивна процедура, що здійснює перетворення робочого стану на вході процедури в поточний стан на її виході із застосуванням відповідних підключів;
- *кількість раундів (r)* – кількість цифрових перетворень при шифруванні;
- *таблиця підстановки* – таблиця заміни (підстановки) байтових значень, що реалізує нелінійне перетворення;
- \lll – циклічний побітний зсув вліво/вправо;
- \ll – по бітний зсув вліво/вправо;
- \oplus – додавання за модулем 2;
- $+$ – додавання за модулем 2^{32} ;
- $*$ – множення за модулем 2^{32} .

Процедура зашифрування. На вхід процедури подаються підключі K_i і відкритий текст, який розбивається на підблоки A, B, C, D . Спочатку виконується повне початкове відбілювання (рандомізація) підблоків A, B, C і D . Потім виконуються r раундових перетворень. Далі виконується повне кінцеве відбілювання підблоків A, B, C і D . Отримані у результаті зашифрування підблоки об'єднують у шифротекст.

Процедура розшифрування. При розшифруванні підключі використовуються в зворотному порядку, накладання підключів замість додавання по модулю 2^n виконується відніманням, зрушення субблоків виконується на початку раунду і у зворотний бік, а також замість процедури *RoundColumns* використовується зворотня до неї – *InvRoundColumns*. Перетворення $f()$ не зазнало змін.

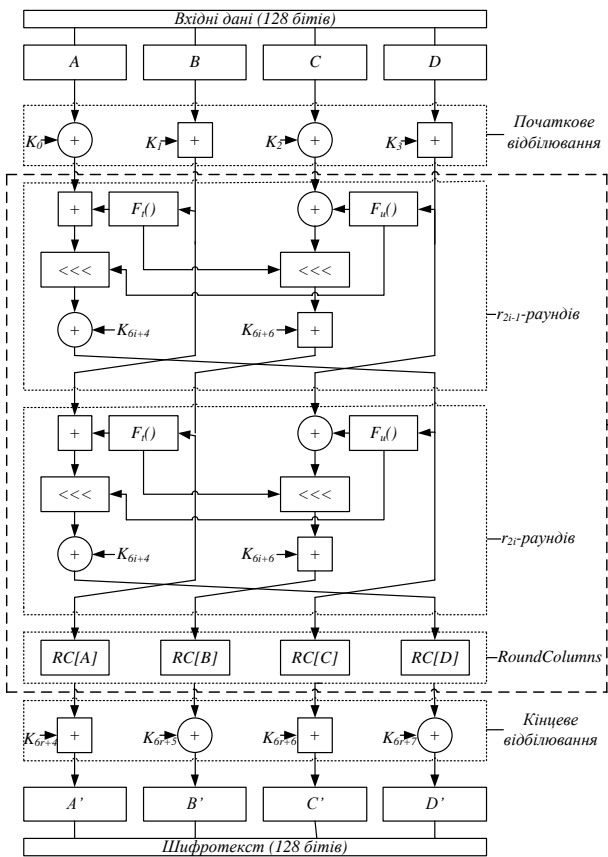


Рис. 1. Загальна схема роботи процедури зашифрування (Fig. 1. General scheme of encryption procedure)

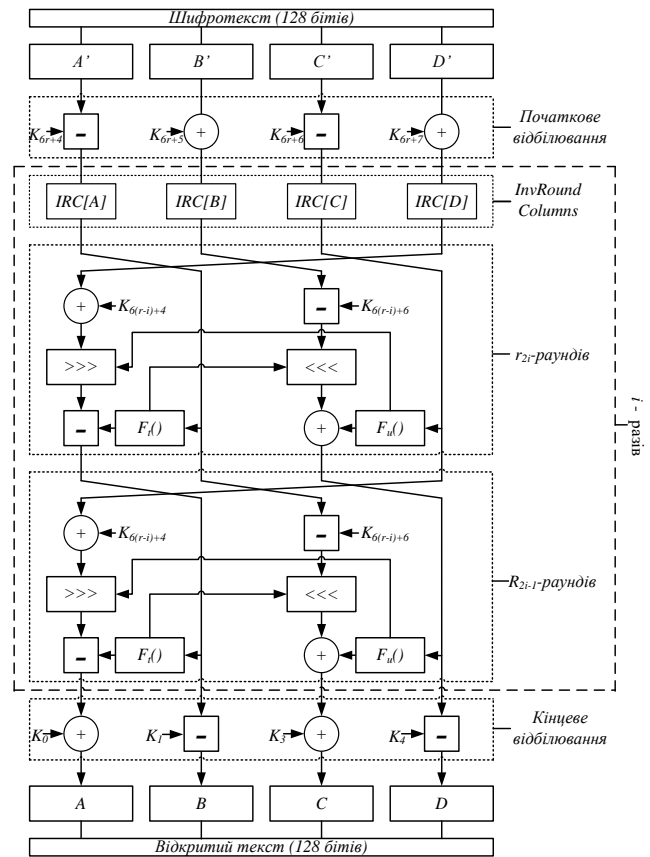


Рис. 2. Загальна схема роботи процедури розшифрування (Fig. 2. General scheme of decryption procedure)

Дослідження стійкості запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах

Експериментальне дослідження запропонованої функції гешування для забезпечення удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах включає у себе такі етапи досліджень:

- лінійних перетворень;
- стійкості до диференціального криптоаналізу;
- стійкості до лінійного криптоаналізу;
- статистичної стійкості;
- швидкісних характеристик;

Розглянемо ці методи криптоаналізу.

Дослідження лінійних перетворень. Багато видів криптоаналітичних атак засновані на лінійності більшості перетворень, що використовуються у шифрах. Під лінійним перетворенням T відносно деякої операції \oplus розуміється перетворення, для якого справедливо: $T(X) \oplus T(X') = T(X \oplus X')$, де $T(X)$ – результат виконання перетворення T для вхідного блоку X . Лінійні перетворення в БСШ вирішують завдання розсіювання, тобто поширюють вплив кожного вхідного біта на як можна більшу кількість вихідних бітів. Основний показник, що характеризує якість розсіювання лінійного перетворення, це число галузей активізації (branch number) [7].

Дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу. Диференціальний криптоаналіз – це

спроба розкриття секретного ключа блокових шифрів, які засновані на повторному застосуванні криптографічно слабкої цифрової операції шифрування визначену кількість раз. При аналізі передбачається, що на кожному циклі використовується свій підключ шифрування. Диференціальний криптоаналіз може використовувати як обрані, так і відомі відкриті тексти. Конкретний спосіб диференціального криптоаналізу залежить від аналізованого алгоритму шифрування. Саме стійкість до диференціального криптоаналізу розглянута у даній роботі.

Дослідження стійкості до лінійного криптоаналізу. Лінійний криптоаналіз використовує лінійні наближення перетворень, що виконуються алгоритмом шифрування. Даний метод дозволяє знайти ключ, маючи досить велику кількість пар (незашифрований текст, зашифрована текст). Розглянемо основні принципи, на яких базується лінійний криптоаналіз. Лінійний криптоаналіз базується на тому, що існує можливість замінити нелінійну функцію її лінійним аналогом.

Дослідження статистичної стійкості. Для дослідження статистичної стійкості використовують тести NIST STS. Розглянемо детальніше опис тестів NIST STS. До них відносяться наступні тести: Частотний (монобітний тест); Частотний блоковий тест; Тест на щонайдовшу послідовність одиниць в блоці; Тест на послідовність однакових бітів; Тест рангів бінарних матриць; Спектральний тест; Тест на збіг шаблонів, що перекриваються; Універсальний статистичний тест Маурера; Тест приблизної ентропії; Тест

на довільні відхилення; Інший тест на довільні відхилення; Тест на періодичність; Тест кумулятивних сум; Тест на збіг шаблонів, що не перекриваються; Тест на лінійну складність.

Дослідження швидкісних характеристик.

Для проведення порівняння швидкостей прототипу (оригіналу криптоалгоритму) та удосконаленого методу перетворення інформації береться програмне забезпечення криптоалгоритму та створюється програмне забезпечення його модифікації. А для проведення порівняльного аналізу швидкостей розробленого генератора криптографічних ключів з генератором ключів, що використовується в криптоалгоритму та лінійно конгруентним генератором береться програмне забезпечення зазначених генераторів та створюється програмне забезпечення розробленого генератора криптографічних ключів. Зпускаючи програмне забезпечення оригіналу та його модифікації на одній платформі, з використанням одних й тих же системних параметрів відбувається замір та порівняння відповідних швидкісних характеристик.

Дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах

Диференційний метод криптоаналізу був запропонований Е.Біхамом й А.Шаміром в 1990 р. Диференціальний криптоаналіз – це спроба розкриття секретного ключа блокових шифрів, які засновані на повторному застосуванні криптографічно слабкої цифрової операції шифрування r раз. При аналізі передбачається, що на кожному циклі використовується свій підключ шифрування. Диференціальний криптоаналіз може використовувати як обрані, так і відомі відкриті тексти. Конкретний спосіб диференціального криптоаналізу залежить від аналізованого алгоритму шифрування.

Успіх таких спроб розкриття r -циклічного шифру залежить від існування диференціалів $(r-1)$ -го циклу, які мають велику ймовірність. Диференціал i -го циклу визначається як пара $(a, b)_i$ така, що пари різних відкритих текстів x, x' з різницею a може привести до пари вихідних текстів y, y' після i -ого циклу, що мають різницю b (для відповідного поняття різниці). Ймовірність i -циклового диференціала $(a, b)_i$ це умовна ймовірність $P(D_{y(i)} = b \mid D_x = a)$ того, що різниця $D_{y(i)}$ пари шифротекстів (y, y') після i -ого циклу дорівнює b за умови, що пара текстів (x, x') має різницю $D_x = a$; відкритий текст x і підключи циклів $k^{(1)}, k^{(2)}, \dots, k^{(i)}$ незалежні і рівно ймовірні.

Для блокових симетричних алгоритмів використовується диференціальний криптоаналіз, як один з найбільш універсальних та потужних видів атак на криптографічні шифри.

Для вираження результату проведення диференційного криптоаналізу використовується так званий критерій стійкості, який для r -циклічного SPN – шифру може бути представлений у вигляді такої нерівності:

$$P_{DX}^{(r-1)} \leq 2^{-n}$$

де r – число раундів; n – розмір блоку в бітах; $P_{DX}^{(r)}$ – верхня границя імовірності r -циклічної диференціальної характеристики.

Опишемо традиційний підхід до оцінки стійкості БСШ до диференціального криптоаналізу:

1. Розраховується таке мінімальне число активних підстановок у диференціальній характеристиці, яке буде покривати потрібне для організації ефективної атаки число циклів.

2. Обчислюється верхня границя імовірності диференціальної характеристики. Для цього використовується два параметри:

- кількість активних підстановок;
- максимальна імовірність проходження ненульової різниці.

Через підстановку відбувається піднесення другого параметру до ступеня першого, тобто:

$$P_{DX}^{(r)} = (P_{D_{max}})^{a^{(r)}}$$

де $a^{(r)}$ – мінімальна кількість активних підстановок в r раундах шифру.

Розрахунок параметра підстановки $P_{D_{max}}$ проводиться за таким алгоритмом:

1. Побудова таблиці залежності вихідних різниць b від вхідних різниць a .

Таблиця різниці складається із значень:

$$e_s(a, b) = \#\{x \in GF(2^n) \mid S(x \oplus a) \oplus S(x) = b\}$$

для всіх варіантів вхідної і вихідної різниці $a, b \in GF(2^n)$, де:

- a – різниця між вхідними даними;
- b – різниця між даними після проходження S -блоків;
- x – змінна, що розраховує кількість разів коли рівність ставала істиною ($x \in GF(2^n)$, тобто приймає значення від 0 до 255);
- $S()$ – блок підстановок.

2. Розрахунок максимальної імовірності проходження різниці, через підстановку $P_{D_{max}}$ розраховується за формулою:

$$P_{D_{max}} = \frac{\max_{a \neq 0; b} e_s(a, b)}{2^n}$$

Провівши аналіз S -блоку алгоритму NRC21, побудована таблиця залежностей вихідних різниць b від вхідних різниць a (залежність b від a в S -блоці).

За таблицею залежностей вихідних різниць b від вхідних різниць a встановлено, що для всіх підстановок, які використовуються у шифрі NRC21 $P_{D_{max}} = 0,0234375$.

Для розрахунку верхньої границі ймовірності для багатоциклових диференціальних характеристик для спрощеного шифру необхідно підставити у зазначену формулу $P_{D_{max}} =$ та $a^{(r)}$.

У табл. 1 виділені осередки, які визначають число циклів, при якому ймовірність диференціальної характеристики знаходиться нижче граничного значення. Дані, що представлені в табл. 1, дозволяють зробити висновок про стійкість до диференціального криптоаналізу шифру NRC21 з 128-бітним блоком, що містить 5 і більше циклів (10 і більше раундів).

Таблиця 1 - Визначення числа циклів, при якому ймовірність диференціальної характеристики знаходиться нижче граничного значення

Розмір блоку, біти	Число циклів							
	1	2	3	4	5	6	7	8
128	2^{-5}	2^{-41}	2^{-50}	2^{-121}	2^{-126}	2^{-162}	2^{-171}	2^{-243}

Висновки

У даній роботі наведено удосконалений модуль криптографічного захисту інформації, який за рахунок фіксування інформації про ідентифікатор користувача, ідентифікатор сесії, час відправлення, довжину повідомлення та його порядковий номер, а також використання нової процедури формування сеансового ключа для шифрування, дозволяє забезпечити конфіденційність і цілісність даних в ІКСМ

управління технологічними процесами. Для ефективного використання цього модуля важливим є вибір криптостійких методів шифрування F_{enc} та гешування F_{hash} , а також синхронізація секретного ключа $authKey$. У якості функцій F_{enc} та F_{hash} можуть бути використані криптоалгоритми, стійкі до лінійного, диференціального, алгебраїчного, квантового та інших відомих видів криптоаналізу.

Проведено дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах. Проведене експериментальне дослідження підтвердило криптостійкість удосконаленого алгоритму до диференціального криптоаналізу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- <https://www.kmu.gov.ua/news/vid-kiberataki-14-sichnya-postrazhdali-22-derzhavnih-organi-derzhspeczvyazku>
- <https://www.kmu.gov.ua/news/shchodo-kiberataki-na-sajti-vijskovih-struktur-ta-derzhavnih-bankiv>
- R. Oppliger, *Cryptography 101: From Theory to Practice*, Artech, 2021.
- Job J, Naresh V and K. Chandrasekaran, "A modified secure version of the Telegram protocol (MTProto)", 2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), 2015, pp. 1-6,
- Dion van Dam, *Analysing the Signal Protocol. A manual and automated analysis of the Signal Protocol*, 21 August 2019, 61 p.
- TLS and SRTP for Skype Connect Technical Datasheet, 2011, 8 p.
- Q. Wu, "A Chaos-Based Hash Function", 2015 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, 2015, pp. 1-4,
- Gnatyuk S., Kinzeravyy V., Kyrychenko K., Yubuzova Kh., Aleksander M., Odarchenko R. Secure Hash Function Constructing for Future Communication Systems and Networks, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 902, pp. 561-569, 2020.
- K. Rajeshwaran and K. Anil Kumar, "Cellular Automata Based Hashing Algorithm (CABHA) for Strong Cryptographic Hash Function", 2019 IEEE Int. Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2019, pp. 1-6,
- Iavich M., Iashvili G., Gnatyuk S., Tolbatov A., Mirtskhulava L. Efficient and Secure Digital Signature Scheme for Post Quantum Epoch, *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1486, pp. 185-193, 2021.
- Gnatyuk S., Iavich M., Kinzeravyy V., Okhrimenko T., Burmak Y., Goncharenko I. Improved secure stream cipher for cloud computing, *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2732, pp. 183-197, 2020.
- Gnatyuk S., Akhmetov B., Kozlovskiy V., Kinzeravyy V., Aleksander M., Prysiashnyi D. New Secure Block Cipher for Critical Applications: Design, Implementation, Speed and Security Analysis, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1126, pp. 93-104, 2020.
- A. Kuznetsov, I. Horkovenko, O. Maliy, N. Goncharov, T. Kuznetsova and N. Kovalenko, "Non-Binary Cryptographic Functions for Symmetric Ciphers", 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2020, pp. 567-572, doi: 10.1109/PICST51311.2020.9467982.
- E. Jintcharadze and M. Iavich, "Hybrid Implementation of Twofish, AES, ElGamal and RSA Cryptosystems", 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224901.
- T. R. Lee, J. S. Teh, N. Jamil, J. L. S. Yan and J. Chen, "Lightweight Block Cipher Security Evaluation Based on Machine Learning Classifiers and Active S-Boxes", in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 134052-134064, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116468.
- Смірнова Т.В., Гнатюк С.О., Бердибаєв Р.Ш., Бурмак Ю.А., Оспанова Д.М., «Удосконалений модуль криптографічного захисту інформації в сучасних інформаційно-комунікаційних системах та мережах». *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. № 2(14). С. 176-185. 2021.
- Смірнова Т.В., Поліщук Л.І., Смірнов О.А., К.О. Буравченко, А.О.Макевнін, «Дослідження хмарних технологій як сервісів», *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. № 3(7). С. 43-62. 2020.
- Смірнова Т.В., Соловях С.К., Смірнов О.А., Дресев О.М., «Побудова хмарних інформаційних технологій оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей», *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. № 1(32). с. 184-194, 2019
- Смірнова, Т.В., Смірнов, С.А., Минайленко, Р.М., Доренський, О.П., Сисоєнко С.В. «Хмарна автоматизована система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для технологічних процесів». *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. №4, 2020, С. 84-92.
- Смірнова Т.В., Буравченко К.О., Кравченко С.С., Горбов В.О., Смірнов О.А. «Хмарна система підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин». *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 4. С. 79-95.

REFERENCES

- <https://www.kmu.gov.ua/news/vid-kiberataki-14-sichnya-postrazhdali-22-derzhavnih-organi-derzhspeczvyazku>
- <https://www.kmu.gov.ua/news/shchodo-kiberataki-na-sajti-vijskovih-struktur-ta-derzhavnih-bankiv>

3. R. Oppliger, *Cryptography 101: From Theory to Practice*, Artech, 2021.
4. Job J, Naresh V and K. Chandrasekaran, "A modified secure version of the Telegram protocol (MTProto)", 2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), 2015, pp. 1-6,
5. Dion van Dam, *Analysing the Signal Protocol. A manual and automated analysis of the Signal Protocol*, 21 August 2019, 61 p.
6. TLS and SRTP for Skype Connect Technical Datasheet, 2011, 8 p.
7. Q. Wu, "A Chaos-Based Hash Function", 2015 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, 2015, pp. 1-4,
8. Gnatyuk S., Kinzeravyy V., Kyrychenko K., Yubuzova Kh., Aleksander M., Odarchenko R. Secure Hash Function Constructing for Future Communication Systems and Networks, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 902, pp. 561-569, 2020.
9. K. Rajeshwaran and K. Anil Kumar, "Cellular Automata Based Hashing Algorithm (CABHA) for Strong Cryptographic Hash Function", 2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2019, pp. 1-6,
10. Iavich M., Iashvili G., Gnatyuk S., Tolbatov A., Mirskhulava L. Efficient and Secure Digital Signature Scheme for Post Quantum Epoch, *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1486, pp. 185-193, 2021.
11. Gnatyuk S., Iavich M., Kinzeravyy V., Okhrimenko T., Burmak Y., Goncharenko I. Improved secure stream cipher for cloud computing, *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2732, pp. 183-197, 2020.
12. Gnatyuk S., Akhmetov B., Kozlovskiy V., Kinzeravyy V., Aleksander M., Prysiaznyi D. New Secure Block Cipher for Critical Applications: Design, Implementation, Speed and Security Analysis, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1126, pp. 93-104, 2020.
13. A. Kuznetsov, I. Horkovenko, O. Maliy, N. Goncharov, T. Kuznetsova and N. Kovalenko, "Non-Binary Cryptographic Functions for Symmetric Ciphers", 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2020, pp. 567-572, doi: 10.1109/PICST51311.2020.9467982.
14. E. Jintcharadze and M. Iavich, "Hybrid Implementation of Twofish, AES, ElGamal and RSA Cryptosystems", 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224901.
15. T. R. Lee, J. S. Teh, N. Jamil, J. L. S. Yan and J. Chen, "Lightweight Block Cipher Security Evaluation Based on Machine Learning Classifiers and Active S-Boxes", in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 134052-134064, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116468.
16. Smirnova T.V., Hnatiuk S.O., Berdybaiev R.Sh., Burmak Yu.A., Ospanova D.M., «Udoskonalenyi modul kryptohrafich-noho zakhystu informatsii v suchasnykh informatsiino-komunikatsiinykh systemakh ta merezhakh». *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*. № 2(14). P. 176-185. 2021.
17. Smirnova T.V., Polishchuk L.I., Smirnov O.A., K.O. Buravchenko, A.O. Makevnin, «Doslidzhennia khmarnykh tekhnolohii yak servisiv», *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*. № 3(7). P. 43-62. 2020.
18. Smirnova T.V., Solovykh Ye.K., Smirnov O.A., Drieiev O.M., «Pobudova khmarnykh informatsiinykh tekhnolohii optymizatsii tekhnolohichnoho protsesu vidnovlennia ta zmitsnennia poverkhon detalei», *Tsentrálnoukraiński naukovyi visnyk. Te-khnichni nauky*. № 1(32). P. 184-194, 2019
19. Smirnova, T.V., Smirnov, S.A., Mynailenko, R.M., Dorenskyi, O.P., Sysoienko S.V. «Khmarina avtomatyzovana systema intelektualnoi pidtrymky pryiniattia rishen dlia tekhnolohichnykh protsesiv». *Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. №4, 2020, P. 84-92.
20. Smirnova T.V., Buravchenko K.O., Kravchenko S.S., Horbov V.O., Smirnov O.A. «Khmarina systema pidtrymky pryiniattia rishen tekhnolohichnoho protsesu vidnovlennia poverkhon konstruksii i detalei mashyn». *Suchasni informatsiini systemy*. 2021. T. 5, № 4. P. 79-95.

Received (Надійшла) 22.02.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.05.2022

Investigation of resistance to differential cryptanalysis of the proposed hashing function of a perfect cryptographic protection module in information and communication systems

Tetiana Smirnova, Nataliia Yakymenko, Serhii Smirnov, Liudmyla Polishchuk, Oleksii Smirnov

Abstract. The object of the study is to ensure the confidentiality of data in information and communication systems for managing technological processes based on cloud technologies. The subject is the study of resistance to differential cryptanalysis of the proposed hashing function of an improved cryptographic protection module in information and communication systems. The purpose of the work is to study the resistance to differential cryptanalysis of the proposed hashing function of an improved cryptographic protection module in information and communication process control systems based on cloud technologies. As a result of the research, the module of cryptographic protection of information has been improved, the study of resistance to differential cryptanalysis of the proposed function of hashing of the improved module of cryptographic protection in information and communication systems has been carried out. The conducted experimental study confirmed the cryptographic stability of the improved algorithm against differential cryptanalysis. **Conclusions.** The cryptographic information protection module has been improved, which, by recording information about the user ID, session ID, sending time, message length and sequence number, as well as using a new procedure for generating a session key for encryption, makes it possible to ensure the confidentiality and integrity of data in information and communication systems process control. For the effective use of this module, it is important to choose cryptographically strong methods of encryption and hashing, as well as synchronization of the secret key. As functions, cryptalgorithms resistant to linear, differential, algebraic, quantum and other known types of cryptanalysis can be used. A study was made of the resistance to differential cryptanalysis of the proposed hashing function of an improved cryptographic protection module in information and communication systems. The conducted experimental study confirmed the cryptographic stability of the improved algorithm against differential cryptanalysis.

Keywords: cryptanalysis, hashing, information and communication systems, information security.

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

КАУЗАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПОБУДОВИ ПОЯСНЕНЬ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси формування пояснень щодо прийнятих в інтелектуальній інформаційній системі рішень. Метою є розробка моделі процесу побудови деталізованих пояснень щодо прийнятого інтелектуальною інформаційною системою рішення на основі каузальних залежностей між відомими станами інтелектуальної інформаційної системи для більш ефективного використання отриманого рішення при вирішенні практичних задач користувача. Завдання: темпоральна структуризація процесу формування пояснень в інтелектуальній інформаційній системі; розробка каузальної моделі процесу формування пояснень. Використовуваними підходами є: підходи до побудови каузальних залежностей, підходи використання темпоральних залежностей у процесах прийняття рішень. Отримані наступні результати. Визначено структуру процесу побудови пояснень з урахуванням темпорального аспекту. На базі отриманої структури розроблено каузальну модель процесу побудови пояснень в інтелектуальній інформаційній системі. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано модель процесу побудови пояснень щодо послідовності дій з формування рішень в інтелектуальній інформаційній системі, що містить у собі упорядковану за множиною темпоральних правил множину станів процесу прийняття рішення в системі, а також множину детермінованих та ймовірнісних каузальних правил, що визначають причинно-наслідкові зв'язки між станами процесу прийняття рішення. Модель орієнтована на побудову пояснень у вигляді послідовності каузальних правил, що зв'язують як послідовні у часі стани процесу прийняття рішення, так і стани, між якими існують послідовності інших станів. Запропонована модель дає можливість виконати деталізацію пояснення, представивши узагальнену каузальну залежність у вигляді комплексу причинно-наслідкових залежностей між проміжними станами процесу прийняття рішення.

Ключові слова: інтелектуальна система, пояснення, процес прийняття рішення, темпоральність, каузальність, причинно-наслідковий зв'язок, темпоральні правила.

Вступ

Використання складних алгоритмів у процесі прийняття рішень в інформаційних системах приводить до труднощів з використанням отриманих рішень, оскільки користувач не завжди може встановити причинно-наслідкові залежності між вхідними даними, ресурсами та отриманим результатом. Складність і непрозорість алгоритмів, що використовуються для отримання рішення, не завжди сприяє довірі користувача до отриманих результатів. В результаті користувач може не використати запропоноване рішення, наприклад щодо рекомендованих товарів або послуг в системі електронної комерції [1-3]. Вирішення цієї проблеми передбачає використання пояснень щодо отриманого рішення [4, 5]. Пояснення описує процес прийняття рішення у вигляді сукупності каузальних залежностей [6]. Такий опис дає можливість пояснити послідовність дій з прийняття рішення із різним ступенем деталізації а також з урахуванням непередбачуваних впливів [7].

На сьогодні існує два підходи до побудови пояснення [8]. По-перше, функціональність пояснення може бути безпосередньо імплементована у процес прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі. Такий підхід забезпечує використання всієї доступної інформації щодо процесу формування рішення, що дає можливість сформувати детерміновані каузальні залежності як елементи пояснення. Однак даний підхід має суттєвий недолік: включення можливості пояснення до існуючої системи потребує виконання трудомісних робіт з кардинальної переробки, перепроєктування останньої.

Другий підхід полягає у доповненні існуючого процесу формування рішення можливостями пояснення щодо запропонованих інформаційною систе-

мою рішень. Даний підхід передбачає доступ до даних щодо побудови рішення, його стану, виконаних дій, а також виявлення каузальних залежностей між станами та діями даного процесу з урахуванням їх упорядкованості у часі. Однак даний підхід має недолік, пов'язаний із складністю повного доступу до даних щодо процесу прийняття рішення. Відсутність повної інформації щодо станів процесу потребує враховувати непередбачувані зовнішні впливи при побудові каузальних залежностей як складових пояснення. Для подолання даного недоліку необхідно розробити моделі та методи опису і побудови каузальних залежностей щодо процесу прийняття рішення в умовах невизначеності.

Існуючі підходи та методи формування пояснень в інтелектуальних інформаційних системах були розроблені згідно програмою побудови самопояснювального штучного інтелекту (Explainable Artificial intelligence) [9]. В рамках даної програми значна увага приділяється використанню каузальних залежностей як основи для побудови пояснень. Каузальні залежності визначаються з використанням баєсовського підходу [10, 11].

Каузальні закономірності можуть бути визначені не лише для окремих змінних, а й для структурованих об'єктів, кожен із яких характеризується множиною змінних [12].

Однак існуючі підходи до виявлення каузальних залежностей недостатньо уваги приділяють побудові причинно-наслідкових зв'язків в умовах динамічного середовища, з урахуванням темпорального аспекту процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Темпоральний аспект враховується лише в сенсі виділення підмножин даних для заданого періоду часу [13].

В той же час, каузальні залежності базуються на темпоральній упорядкованості процесу прийняття рішення. Тобто причина має бути реалізована до наслідку. Відповідно, наявність темпорального зв'язку між станами процесу прийняття рішення є необхідною умовою для виявлення каузальних залежностей між цими станами.

Темпоральні залежності були розглянуті в роботах [14-16]. В роботах [14, 15] запропоновано використовувати зважені темпоральні правила для декомпозиції та формування процесів підтримки прийняття управлінських рішень. В [16] деталізовано відмінності між х-правилами, що задають порядок для пари послідовних станів, та f-правилами, що призначені для упорядкування станів з меншою деталізацією, наприклад початкового та кінцевого станів підпроцесу.

Таким чином, доповнення процесу прийняття рішеннями можливостями пояснень з використанням каузальних залежностей, що відображають упорядкованість станів та дій цього процесу у часі, є актуальною задачею.

Метою статті є розробка моделі процесу побудови деталізованих пояснень щодо прийнятого інтелектуальною інформаційною системою рішення на основі каузальних залежностей між відомими станами інтелектуальної інформаційної системи для більш ефективного використання отриманого рішення при вирішенні практичних задач користувача. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- темпоральна структуризація процесу формування пояснень в інтелектуальній інформаційній системі;
- розробка каузальної моделі процесу формування пояснень.

Темпоральна структуризація процесу формування пояснень в інтелектуальній інформаційній системі

Процес побудови пояснень щодо прийнятого рішення в інтелектуальній інформаційній системі є розширенням процесу формування такого рішення. Останній складається з послідовності автоматизованих та автоматичних дій. Перші виконуються у взаємодії з користувачем, а другі – засобами інформаційної системи за заданим алгоритмом. Тому в першому випадку послідовність дій містить ймовірнісну складову, а в другому є детермінованою. Кожна з цих дій змінює стан інформаційної системи.

Розглянемо темпоральні властивості процесу прийняття рішення. Послідовність станів у часі відображає послідовність виконаних дій даного процесу. Багаторазове формування рішення приводить до виникнення множини послідовностей виникнення станів $S_i : (\forall i) S_i = \langle s_{i,1}, s_{i,2}, \dots \rangle$.

Кожна з указаних лінійних послідовностей S_i відображає лише один варіант формування рішення і складається із упорядкованих у часі подій виникнення станів $s_{i,j}, s_{i,m}, s_{i,n}$.

Тобто для довільної пари подій виникнення станів $\langle s_{i,j}, s_{i,n} \rangle$, що належать до однієї послідовності,

завжди існує темпоральна залежність $t_{i,n}^{i,j}$:

$$\forall (s_{i,j}, s_{i,n}) \in S_i \exists t_{i,n}^{i,j}. \quad (1)$$

Темпоральне правило r_n^j об'єднує у собі декілька залежностей $r_{i,n}^{i,j}$ [16].

Якщо всі послідовності S_i містять у собі залежність $r_{i,n}^{i,j}$, то правило є обмеженням, що задає обов'язкове виконання дії, яка привела інформаційну систему від події виникнення стану $s_{i,j}$ до виникнення стану $s_{i,n}$ у моменти часу t_j та t_n відповідно.

В іншому випадку правило визначає можливі умови виконання дій при виникненні станів $s_{i,j}$ та $s_{i,n}$. Тобто обмеження задає більш загальні залежності між станами.

Наведені властивості темпорального обмеження свідчать, що воно може бути використано для побудови детермінованої каузальної залежності між станами інформаційної системи при формуванні пояснень. Умовні переходи між станами є основою для ймовірнісних каузальних залежностей, оскільки вони мають враховувати вплив непередбачуваних зовнішніх та внутрішніх факторів.

В цілому при темпоральній структуризації процесу побудови рішення задається через множину станів $S = \{s_n\}$. Кожен стан характеризується множиною змінних, що відображають властивості процесу прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі. Значення цих змінних у момент часу t_n характеризують виникнення стану s_n на одній з можливих послідовностей дій з формування рішення такої системи. Між станами процесу побудови рішення задано темпоральні відношення $r_{i,n}^{i,j}$. Останні узагальнюються у вигляді темпоральних правил r_n^j .

Процес прийняття рішення з урахуванням представленої структуризації може бути представлений у вигляді направленої ациклічного графу G .

Вершинами даного графу є стани інформаційної системи s_n , а дугами - темпоральні правила r_n^j , які відображають дії з формування рішення та пов'язують стани інформаційної системи:

$$G : S \times S \rightarrow R, \quad (2)$$

де $R = \{r_n^j\}$ - множина темпоральних правил.

Ілюстративний приклад графу G з окремими темпоральними правилами наведено на рис. 1.

На даному рисунку окремо виділено темпоральні правила типу "future" [16] позначенням f_n^j . Дані правила пов'язують вершини графу, між якими є інші вершини. Наприклад, темпоральне правило f_{10}^5 задає упорядкованість для пари станів $\langle s_5, s_{10} \rangle$, між якими існують інші стани (позначено 3 точками).

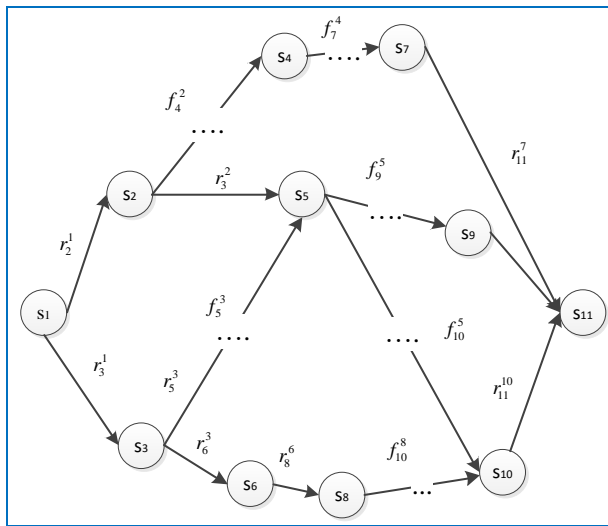


Рис. 1. Приклад графу G з окремими темпоральними правилами

На відміну від f -правил, всі інші правила пов'язують лише послідовні пари станів. Наприклад, правило r_2^1 пов'язує стани $\langle s_1, s_2 \rangle$, що виникли послідовно у часі, тобто має узагальнений вид r_{j+1}^j .

З позицій побудови пояснення перехід між станами для правила виду r_{j+1}^j може бути обґрунтований виконанням відповідної дії з формування рішення. У випадку, якщо такі правила є обмеженням, то сформовані на їх основі пояснення однозначно задають причинно-наслідкову залежність y_{j+1}^j для пари станів $\langle s_j, s_{j+1} \rangle$ на будь-якій послідовності S_j , тобто для будь-якої пари подій виникнення станів $\langle s_j, s_{j+1} \rangle$:

$$y_{j+1}^j = \langle s_j, s_{j+1} | \forall i \exists \langle s_{i,j}, s_{i,j+1} \rangle \rangle. \quad (4)$$

Іншими словами, відомий перехід між станами s_j та s_{j+1} є наслідком однієї дії з формування управлінського рішення. Оскільки кожен стан задається множиною змінних, то така дія може бути представлена в моделі процесу формування пояснень як властивість стану. Дане узагальнення дає можливість безпосередньо показати причину переходу від стану s_j до стану s_{j+1} через властивість другого стану.

В тому випадку, якщо темпоральне правило r_{j+1}^j не є обмеженням, то на його основі доцільно сформувати ймовірнісну каузальну залежність. Дана залежність враховує непередбачувані впливи, інформація про які не враховується у вигляді станів у графі G . Тобто ймовірнісна залежність відображає неповноту моделі процесу прийняття рішення. Остання виликана «непрозорістю» даного процесу в системах обчислювального інтелекту.

На відміну від розглянутих правил r_{j+1}^j , темпоральні правила виду f_n^j містять проміжні стани s_m ,

які впливають на фінальний стан s_n . Такі проміжні стани можуть бути доступними для користувача, або ж виникати внаслідок неконтрольованих впливів. В останньому випадку інформація про такі стани є неповною або ж відсутньою.

Ілюстрація відмінності між правилами для зафіксованих та недоступних проміжних станів представлена на рис. 2.

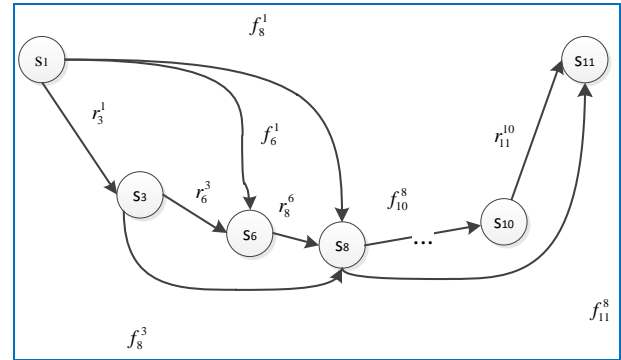


Рис. 2. Відмінності між правилами для зафіксованих та недоступних проміжних станів

В першому випадку правила f_n^j можуть бути представлені у вигляді множини послідовних темпоральних правил, наприклад:

$$f_n^j = \langle r_{j+1}^j, r_n^{j+1} \rangle. \quad (5)$$

Кожне з правил r_{j+1}^j, r_n^{j+1} зв'язує послідовні стани $\langle s_j, s_{j+1} \rangle, \langle s_{j+1}, s_n \rangle$, що створює умови для формування пояснення шляхом формування причинно-наслідкових залежностей r_{j+1}^j та r_n^{j+1} між цими парами станів. Наприклад, на рис. 2 правило f_6^1 має вигляд: $f_6^1 = \langle r_3^1, r_6^3 \rangle$. На базі даного правила формується ймовірнісна каузальна залежність y_6^1 для побудови пояснення:

$$y_3^1 = \langle y_3^1, y_6^3 \rangle. \quad (6)$$

Ймовірність реалізації цієї залежності традиційно є добутком ймовірностей її складових:

$$P(p_3^1) = P(y_3^1)P(y_6^3). \quad (7)$$

Останні розраховуються на основі співвідношення кількості послідовностей S_j , на яких були реалізовані ці залежності, та загальної кількості послідовностей I :

$$P(y_{j+1}^j) = \left| \left\{ S_i : \exists \langle s_{i,j}, s_{i,j+1} \rangle \right\} \right| / I. \quad (8)$$

У другому випадку для темпорального правила f_n^j існують незафіксовані проміжні стани s_m , або ж інформація про ці стани не є повною. Це означає, що на причинно-наслідковий зв'язок між станами s_j та s_n впливали не лише дії з формування рішення, але й

зовнішні фактори. В даному випадку для визначення позицію темпоральних зв'язків між станами на зв'язки між окремими змінними, що характеризують ці стани, виділити змінні, які змінили значення при переході від стану s_j до стану s_n , та встановити каузальні залежності між цими станами методами, запропонованими в роботах [10]. Виконана структуризація процесу формування пояснень з урахуванням темпорального аспекту дає можливість формалізувати каузальну модель даного процесу.

Каузальна модель процесу формування пояснень

Процес формування пояснень містить у собі такі елементи:

- множину S станів процесу формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі;
- множину R темпоральних залежностей між станами, що відображають послідовність подій виникнення станів в результаті виконання послідовності дій з формування рішення в інформаційній системі;

Таблиця 1 – Характеристики каузальних залежностей для пар послідовних станів

Залежність	Базове темпоральне правило	Відмінності при формуванні пояснення
Детермінована залежність для двох послідовних станів	Темпоральне обмеження для двох послідовних станів	Виконується для всіх варіантів формування рішення
Ймовірнісна залежність для двох послідовних станів	Темпоральна умова для виникнення двох послідовних станів процесу формування рішення	Враховується вплив зовнішніх факторів; виконується не для всіх послідовностей станів процесу формування рішення

Таблиця 2 – Характеристики каузальних залежностей для пар станів, що пов'язані темпоральними залежностями f -типу

Залежність	Базове темпоральне правило	Відмінності при формуванні пояснення
Детермінована каузальна залежність для двох станів, між якими існують інші відомі стани	Темпоральне обмеження f -типу	Є об'єднанням декількох каузальних залежностей для двох послідовних станів
Ймовірнісна каузальна залежність для двох станів, між якими існують інші відомі стани	Темпоральна умова f -типу	Є об'єднанням декількох ймовірнісних каузальних залежностей для двох послідовних станів
Детермінована каузальна залежність для двох станів, не всі стани між якими є відомими	Темпоральне обмеження f -типу	Дана залежність є узагальненою і не може бути деталізована через залежності між проміжними станами; дана залежність може бути використана для спрощеного, узагальненого пояснення
Ймовірнісна каузальна залежність для двох станів, не всі стани між якими є відомими	Темпоральна умова f -типу	Дана залежність може бути уточнена з урахуванням ймовірностей проміжних станів; може бути використана поетапної деталізації пояснення

Висновки

Виконано темпоральну структуризацію процесу формування пояснень в інтелектуальній інформаційній системі. Визначено такі структурні елементи даного процесу: стани процесу прийняття рішень; темпоральні зв'язки між станами; каузальні залежності між станами, що відповідають темпоральним зв'язкам та представляють елементи пояснення. Запропонована структура орієнтована на вирішення задачі доповнення існуючого процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі можливостями пояснення. Запропоновано модель процесу побудови пояснень щодо послідовності дій з формування рішень в

– множину Y ймовірнісних та детермінованих каузальних залежностей між станами, що відображають причини виникнення кожного з станів процесу формування рішення з урахуванням попереднього стану та дії, що привела до поточного стану.

Характеристики каузальних залежностей даного процесу формування наведено в табл. 1 та табл. 2. Каузальна модель процесу формування пояснень, що враховує упорядкованість дій даного процесу у часі, має вигляд:

$$M = \langle S, R, Y \rangle, S = \{s_n\},$$

$$R = \{r_n^j : (\forall n \neq j) \exists \langle s_j, s_n \rangle\}, \quad (9)$$

$$Y = \{y_n^j : (\forall y_n^j) \exists r_n^j\}.$$

Модель (9) передбачає роздільне виявлення детермінованих та ймовірнісних каузальних залежностей з урахуванням наявності проміжних станів між початковим та кінцевим станом кожної залежності.

інтелектуальній інформаційній системі, що містить у собі упорядковану за множиною темпоральних правил множину станів процесу прийняття рішення в системі, а також множину детермінованих та ймовірнісних каузальних правил, що визначають причинно-наслідкові зв'язки між станами процесу прийняття рішення. Модель орієнтована на побудову пояснень у вигляді послідовності каузальних правил, що зв'язують як послідовні у часі стани процесу прийняття рішення, так і стани, між якими існують послідовності інших станів. Запропонована модель дає можливість виконати деталізацію пояснення, представивши узагальнену каузальну залежність у вигляді комплексу причинно-наслідкових залежностей між проміжними

станами процесу прийняття рішення. **Подальший розвиток** даного підходу пов'язаний із удосконаленням методів побудови каузальних залежностей на основі темпоральних правил з урахуванням непередбачуваних зовнішніх впливів на процес прийняття рішення.

REFERENCES

1. Fararni K., Aghoutane B., Riffi J., Abdelouahed S. (2020). Comparative Study on Approaches of Recommendation Systems. *Embedded Systems and Artificial Intelligence*, 753-764. doi: 10.23919/AEIT.2018.8577311. Available at: https://www.researchgate.net/publication/340497029_Comparative_Study_on_Approaches_of_Recommendation_Systems.
2. Izquierdo-Castillo, J. (2015). The new media business concept led by Netflix: A study of the model and its projection into the Spanish market. *El Profesional de la Informacion*, 24 (6), 819-826. doi: 10.3145/epi.2015.nov.14. Available at: <https://recyt.fecyt.es/index.php/EPI/article/view/epi.2015.nov.14>.
3. Chalyi, S., Leshchynskiy, V., Leshchynska, I. (2019). Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 34–40. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00952>. Available at: <http://eu-jr.eu/engineering/article/view/952/934>.
4. Tsai C., Brusilovsky P. (2019). Explaining recommendations in an interactive hybrid social recommender. *Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI '19)*, 391-396. doi: 10.1145/3301275.3302318. Available at: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3301275.3302318>.
5. Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. (2019). Моделювання пояснень щодо рекомендованого переліку об'єктів з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 6 (58), 97-101. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.6.097>.
6. Chalyi, S., Leshchynskiy, V. (2020). Method of constructing explanations for recommender systems based on the temporal dynamics of user preferences. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 43-50. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001228.
7. Чалий С. Ф. Реляційно-темпоральна модель набору сутностей предметної області для процесу формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі / С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 1 (7). – С. 84-89.
8. Adadi, A., Berrada, M. (2018) Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI). *IEEE Access* 6, 52138– 52160.
9. Gunning i D. Aha, (2019) “DARPA’s Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program”, *AI Magazine*, Vol. 40(2), pp.44-58, doi: 10.1609/aimag.v40i2.2850.
10. Pearl J (2009) *Causality: Models, Reasoning and Inference*, 2nd ed. Cambridge University Press, USA.
11. Halpern J. Y., Pearl J. (2005), *Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations*. *The British Journal for the Philosophy of Science*. Vol.56 (4). P. 889-911.
12. Maier M, Marazopoulou K, Jensen D (2014) Reasoning about Independence in Probabilistic Models of Relational Data. *arXiv*
13. Marazopoulou, Katerina, Maier, Marc, and Jensen, David. Learning the structure of causal models with relational and temporal dependence. In *Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence* (2015).
14. . Levykin V., Chala O. Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/3(95). P. 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142664
15. Чала О. В. (2020) Модель узагальненого представлення темпоральних знань для задач підтримки управлінських рішень. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Системний аналіз, управління та інформаційні технології. № 1(3). С. 14-18. DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.03.
16. Chala O. (2018) Models of temporal dependencies for a probabilistic knowledge base. *Econtechmod. An International Quarterly Journal*. Vol. 7, No. 3. P. 53 – 58.

Received (Надійшла) 29.05.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

Causal model of the process of constructing explanations in the information system

S. Chalyi, V. Leshchynskiy, I. Leshchynska

Abstract. The **subject matter** of the article is the processes of formation of explanations regarding the decisions made in the intellectual information system. The **goal** is to develop a model for the process of constructing detailed explanations regarding the decision made by an intelligent information system based on causal dependencies between known states of an intelligent information system for more efficient use of the resulting solution in solving practical user problems. **Tasks:** temporal structuring of the process of formation of explanations in the intellectual information system; development of a causal model of the process of formation of explanations. The **approaches** used are: approaches to the construction of causal dependencies, approaches to the use of temporal dependencies in decision-making processes. The following results are obtained. The structure of the process of constructing explanations is determined, taking into account the temporal aspect. On the basis of the obtained structure, a causal model of the process of constructing explanations in an intelligent information system has been developed. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows. A model of the process of constructing explanations regarding the sequence of actions for the formation of decisions in an intelligent information system is proposed, containing a set of states of the decision-making process ordered by a set of temporal rules, as well as a set of deterministic and probabilistic causal rules that determine cause-and-effect relationships between the states of the decision-making process. The model is focused on construction of explanations in the form of a sequence of causal rules that connect both successive states of the decision-making process in time, and states between which there are sequences of other states. The proposed model makes it possible to refine the explanation by presenting a generalized causal dependence through a complex of cause-and-effect dependencies between intermediate states of the decision-making process.

Keywords: intellectual system, explanation, decision-making process, temporality, causality, causality, temporal rules.

Serhiy Mosov¹, Oleksii Horskyi²

¹ Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Kyiv, Ukraine

² National aviation university, Kyiv, Ukraine

TECHNICAL ASPECTS OF AVIATION FIREFIGHTING IN ECOSYSTEMS: THE EXPERIENCE OF FOREIGN COUNTRIES

Abstract. The article examines the technical aspects of aviation firefighting in ecosystems based on the experience of leading countries around the world. The features of natural and man-made ecosystems in the plane of fire suppression are disclosed. It is specified conditionality of occurrence of requirement in aviation firefighting, first of all, by existing features of ecosystems, and also available level of technical development and possibilities of manned aviation on operative performance of tasks of firefighting in ecosystems. The state of fire aviation of the USA and Canada, European countries, China and other countries, as well as infrastructural peculiarities in organization of fire extinguishing from the air were investigated. According to the results of the study it is noted that the fleet of fire-fighting aviation or aviation involved in fire suppression consists of different types of aircrafts and helicopters, which are used depending on the ecosystem for rapid elimination of the fire occurred in the ecosystem. Attention is focused on the prospects of creating aviation firefighting means based on unmanned aviation, which develops in an avalanche-like manner and allows to optimize firefighting in different ecosystems. Attention is drawn to the direction of development, though not quite new, but useful, the essence of which is the use of aviation firefighting means in the form of special bombs on the example of Russia, China and Israel. The state of fire-fighting aviation fleet of Ukraine was analyzed. Proposals of technical and organizational character of the further development of fire extinguishing from air in Ukraine are investigated. The analysis of the given proposals showed that the direction connected with the development of unmanned aerial firefighting aircraft in natural and artificial ecosystems of Ukraine still remains at the level of ideas, though it requires further promotion in our country, which has a number of aviation enterprises, capable of successfully solving the following problems under the conditions of the necessary financing. The conclusions focus on the fact that the considered directions of development of fire aviation in Ukraine are mostly at the level of ideas, which should be, first of all, scientifically grounded. The directions of further research should be considered the development of the newest and scientifically justified technical solutions with their subsequent implementation in the infrastructure of aviation firefighting in Ukraine.

Keywords: ecosystem, fire, aviation firefighting, firefighting aircraft.

Formulation of the problem

An ecosystem is defined as a structural and functional unit of the biosphere, which includes both organisms and the biotic environment, which influence each other's properties and are necessary for life support.

There are two types of ecosystems - natural and artificial. A naturally occurring system develops through the constant interaction between biotic and abiotic environmental factors. A man-made artificial system consists of plants, animals, people, and technology for its own good [1].

Ecosystems occasionally experience fires:

forest fires,
steppe fires,
agricultural fields,
administrative or residential buildings,
civilian and military warehouses, etc.

Depending on the fire and the place of its origin, various means of extinguishing are used, including firefighting aviation.

Global innovations in the field of piloted fire (firefighting) aviation and the avalanche-like development of various unmanned aircraft systems (complexes), which gave impetus to the activation of the idea of using unmanned aerial vehicles (hereinafter referred to as UAVs) for extinguishing fires from the air both in a separate application and together with piloted

aviation, is the basis for the further development of aviation firefighting in ecosystems.

In 2018, the State Emergency Service of Ukraine (hereinafter referred to as the Emergency Situations Service of Ukraine), which has its arsenal of aerial firefighting - piloted An-32P aircraft - took the first step towards the introduction of unmanned aviation in the field of aerial monitoring of emergency situations (fires, floods, landslides, etc.) in the activities of its regional structures, which were represented by various types of quadcopters:

DJI Phantom 2;
DJI Phantom 2 Vision;
DJI Phantom 3 Professional, Hubsan H502S FPV;
DJI Matrice 100, DJI Matrice 200;
DJI Mavic Air;
DJI Mavic 2 Zoom;
Yuneec Typhoon H

and others [2, 3].

In Ukraine, there are also Mi-8MTV-1 firefighting helicopters from the fleet of the airline company "Ukrainian Helicopters" [4].

Analysis of recent research and publications

A number of domestic and foreign scientists and specialists dealt with some issues of research on the foreign experience of aviation firefighting and its development.

Thus, in the article "Monitoring forest fires with UAVs" (2019), attention is focused on the use of UAVs for timely solving the tasks of detecting fires and their extinguishing, as well as accompanying fire extinguishing measures [5]

Proposals for the use of copter-type UAVs for aerial firefighting are outlined in "How Firefighters Can Better Manage Emergency Situations Using Drones" (2019) [6].

The results of the analysis of the state of manned firefighting aviation in the world and in Ukraine, as well as problematic issues and some proposals for its further development are presented in the article "Proposals for the Development of Firefighting Aviation of Ukraine" (2020) [7].

The role of piloted aviation in extinguishing forest fires and the main tasks that must be solved in Ukraine to increase the effectiveness of extinguishing fires in natural ecosystems with the use of piloted aviation were disclosed by a team of authors in the article "Organizational aspects of the use of aviation forces for forest fire extinguishing" (2021) [8]

In the article "Unmanned aerial vehicles - a vital robotic tool of modern times" (2021), the author partially noted that according to the experience of the leading countries of the world, UAVs are considered a breakthrough technology in the field of robotics and are actively used in the field of civil defense not only for detecting and preventing fires, but also for their quenching in ecosystems [9].

The possibility of using UAVs for extinguishing fires with specific requirements for them is indicated in the material "Theory and Practice of Fire Firefighting and Eliminating Emergency Situations" (2021) [10].

In the work "Firefighter Drones 2022: Top Full Guide For You" (2022), the author focuses on the possibility of using copter-type UAVs for quick and effective delivery of water and other anti-permeants to the places of fire [11].

The conducted analysis showed that research is being conducted that sheds light on some issues regarding the directions of development of aviation firefighting in ecosystems. At the same time, the issue of systematization of foreign experience in Ukraine in the field of development of aviation firefighting in natural and artificial ecosystems remains problematic and requires research in order to determine possible directions for the development of firefighting aviation in Ukraine.

The purpose of the article

To systematize the foreign experience of aviation firefighting in ecosystems and directions of its development, as well as to substantiate proposals regarding possible directions of development of firefighting aviation in Ukraine.

Research methods

The method of theoretical research is used, the components of which are the following operations: analysis, synthesis, analogy, comparison, generalization, systematization, etc.

Presenting main material

Aviation firefighting has its own history. The idea of using aviation to detect fires in natural ecosystems first appeared in the USA in 1916 [12].

However, it could be put into practice only three years later, when the federal government transferred several firefighting planes to the U.S. Forest Service to monitor forest fires in California, Oregon, and Washington. In Canada, the aircraft for monitoring began to be used in 1921, and in the USSR - a few years later.

In the USSR, aerial fire monitoring was implemented later than in the USA and Canada. At the same time, the Soviet Union became the first country in the world to drop fire-fighting substances from the air, thereby opening the era of using aviation to extinguish fires.

This happened in 1933 when extinguishing a steppe fire on the territory of the grain farm of the North Caucasus branch of the VNDISH branch (dropping water from the U-2SP aircraft on the burning remains of the stalk 70-80 cm high after harvesting grain) [13].

Before the Second World War, aircraft were mainly involved in patrolling forests, monitoring the fire situation and landing firefighters to fight fires. Experiments were conducted with dropping water from the plane, but the small volumes of liquid for fire extinguishing and the lack of a unified system for fighting forest fires at the time made such a plane ineffective. In the USSR, Po-2 and R-5 aircraft were converted for this purpose. After the war, the situation changed radically. This is especially true in the US, where the bombers left in large numbers after the war were sold at low prices, and the government at the time began to show concern about the ever-increasing damage from forest fires. The bombers were converted to dump water, which became the basis for the creation of the 50s of the 20th century. In the USA and Canada, a powerful fleet of such aircraft:

B-17,
B-24,
B-26,
PB4Y,
Tigercat,
Avenger, etc. [14].

In 1969, the CL-215 amphibious aircraft, designed specifically for extinguishing forest fires from the air, made its first flight in Canada [15].

Two conclusions can be drawn from the historical analysis of aviation firefighting. The first is the conditioning of the need for aviation firefighting, first of all, by the existing features of natural ecosystems. The second is the level of technical development and capabilities of manned aviation for the prompt execution of firefighting tasks in natural ecosystems.

The development of humanity on the planet has led to the creation of artificial ecosystems for various purposes, which, like natural ones, have grounds for using manned aircraft to extinguish fires that occur in such artificial ecosystems as, for example, agricultural fields with cereal crops or fuel storage sites located on open areas.

In connection with the above, we will briefly consider the characteristics of natural and artificial ecosystems using the example of Ukraine, which determine the necessity and difficulty of using piloted aviation for extinguishing fires that occur in them. Terrestrial natural ecosystems of Ukraine include forests and steppes.

The forest zone is located in the north and west of the plain part of Ukraine. It occupies about 24% of the country's territory. Within its boundaries, two subzones are distinguished: mixed (17% of the area) and broad-leaved forests (7% of the area). The broad-leaved forest subzone occupies the western part of Ukraine. The steppes were preserved only in the system of protected objects on the area, which is about 0.6% of the territory of Ukraine [16].

Any ecosystem is characterized by its dimensions. Forests and steppes are considered to be long area objects of considerable size. This determines the possibility of using firefighting aircraft for extinguishing fires, under the conditions of their occurrence and coverage of the territory of ecosystems. For this, there are also necessary conditions to ensure the safety of manned aircraft flights.

The composition of artificial ecosystems includes cities and villages with their infrastructure, agricultural land, separate various civil and military infrastructures (fuel storage bases; separate large production enterprises; power plants, including nuclear ones; large warehouses of products; arsenals with ammunition; weapons storage bases and military equipment, etc.), in which or on which fires occasionally occur for various reasons.

On the territory of Ukraine there is a very dangerous artificial ecosystem "Chernobyl Exclusion Zone", which, in addition to its considerable size, has another characteristic - a different level of radiation pollution in its territory after the accident at the Chernobyl nuclear power plant in 1986.

For extinguishing fires, for example, on agricultural land, arsenals with ammunition, bases for storing weapons and military equipment, in the Chernobyl exclusion zone, as experience shows, piloted firefighting aircraft can be used. For extinguishing fires in the conditions of a city, especially a sufficiently urbanized one, such aviation can be used to a limited extent if there are, for example, square fires, due to the dangers and consequences for the ecosystem that may be associated with the occurrence of an aviation event and its negative consequences under the conditions falling on residential blocks.

At the same time, fire statistics in Ukraine show a significant number of local fires occurring within cities and towns: 57% and 42%, respectively, of the total number of fires. For comparison, fires in natural ecosystems do not occur so often and account for 0.2% of the total number of fires, but the consequences and damages from such fires are very impressive [17].

Scientific and technical progress has increased the possibilities for the further development of firefighting aviation and created conditions for the development and use of unmanned aviation not only in the interests of monitoring, but also for direct extinguishing of fires, including within such artificial ecosystems as cities and

villages, which is confirmed the experience of a number of foreign countries.

Piloted aviation, which is used for firefighting in ecosystems at the current stage, is divided into two groups: airplanes and helicopters. It should be emphasized that in most countries the number of helicopters regularly used for firefighting exceeds the number of specialized piloted firefighting aircraft. This is primarily due to the wider introduction of helicopters in the activities of rescue services and forestry, as well as the spread of various types of drainage devices for helicopters, which allows you to quickly modify any civilian or military helicopter into a firefighting one, if there is a suitable attachment and strength of the power installation allows you to lift the appropriate weight. Let's consider the technical aspects of firefighting from the air based on the experience of a number of countries around the world.

In the United States and Canada, modern firefighting aviation is represented by heavy manned aircraft based on wide-body civilian airliners and military transport aircraft. Mainly used are airplanes taking off from ground airfields. This is due to the fact that large tracts of industrially important forest are located in the western United States, where bodies of water suitable for landing seaplanes are quite rare. The large carrying capacity of airfield-based aircraft, compared to amphibious aircraft, allows to partially compensate for their low performance. Such planes, for example, include the world's largest firefighting plane, the Boeing 747ST Supertanker, capable of dropping about 72,000 liters of water or fire retardant immediately in one flight, or gradually in several places. DC-10 and BAe-146 firefighting aircraft are widely used [18]. Aviation firefighting is also represented by a fleet of such aircraft as: AT-802F, P2V, C-130H, MD-87, C-130Q, RJ85, C-130 H&J.

The firefighting aviation includes amphibious aircraft CL-215, CL-415, CL-515 and Air Tractor Fire Boss [19].

Helicopters in various configurations are actively used for firefighting in the US and Canadian ecosystems. The advantages of helicopters, despite the significant operating costs and limited carrying capacity, are considered to be the ability to fill water tanks in almost any reservoir, as well as greater efficiency due to the increased accuracy of dropping this water to the scene of the fire. It should be noted that until the early 1960s, helicopters were almost never used to protect forests from fires in the United States, as there were few commercial airlines and the military provided helicopters only in critical situations when wildfires became uncontrollable. After the so-called "helicopter boom" that began in the late 1960s, when affordable and reliable models appeared on the civilian market, the use of helicopters in forest protection became commonplace. Chinook CH-47, which can transport more than 11,000 liters of water [20], is considered one of the largest firefighting helicopters both in the USA and in the world.

The line of firefighting helicopters of the USA and Canada includes:

Sikorsky S-64,

Sikorsky S-70 [21],
Bell-212 HP [22],
Bell-412 [23], etc.

To ensure replenishment of water reserves for firefighting in 2020, a special fully automated platform 69 Bravo is connected to the structure of air extinguishing, which allows crews to refuel helicopters with water without even needing to land [20].

Helicopters are also used for extinguishing fires at individual objects due to the presence of open air space above them, which happened, for example, in 2020, when with the help of a helicopter as part of the fire department of the city of Los Angeles, a fire that threatened was quickly extinguished a large one-story residential building in Northridge [24].

More than 816,000 rescue operations are carried out in Europe every year, and the resources needed to fight fires are as diverse as the landscape. Thus, in Spain, the Babcock and Titan Aerial Firefighting firms are engaged in extinguishing fires from the air on the basis of contracts. Babcock's role in firefighting missions is twofold: providing real-time tactical information to the forward command post and fighting fires from the air. Babcock has a leased aircraft fleet of 57 firefighting aircraft, including helicopters (Bell-412, S-64) and airplanes (CL-215, CL-415, etc.). The Babcock aircraft park also includes UAVs for monitoring and targeting. Titan Aerial Firefighting operates in Spain with its own AT-802F firefighting aircraft [25].

In Italy, the Italian fire service deals with firefighting issues. Babcock also, as in Spain, performs on the territory of Italy on the basis of contracts a full range of tasks related to aerial firefighting, including water discharge, ground transportation of firefighters, coordination of missions and collection of video information in real time for transmission to command and control centers [25].

Portugal is another country where Babcock also provides aerial firefighting services. AT-802F amphibious aircraft are operated by the local company Agro-Montia.

The Swedish Emergency Management Agency (MSB) implements aviation firefighting capabilities through Saab on a contractual basis. Saab uses AT-802F firefighting aircraft to extinguish fires from the air [26].

Israel's aerial firefighting unit is part of the police force and helps firefighters on the ground detect and extinguish fires. The fire squadron is equipped with AT-802F aircraft and H-125 and H-145 helicopters for aerial firefighting. Firefighting helicopters use a strong and flexible Bambi Bucket to collect and deliver water to the firefighting site [27, 28].

Aviation firefighting in Greece is carried out by the 359th Air Support Squadron of the Public Services. The squadron includes firefighting aircraft:

PZL M.18 Dromaders,
PZL M.18BS Dromaders,
CL-215,
CL-415,
CL-515,
Bell-47,
Bell OH-13H helicopters.

If necessary, Greece rents firefighting aircraft in other countries, for example, the Be-200 amphibious aircraft from the Russian Federation [25, 29].

France, through the General Directorate of Civil Defense and Crisis Management, uses specialized aviation to fight fires from the air. Aircraft carry the inscription Securite Civilial on their board together with the international symbol of civil defence. The fleet of firefighting aircraft includes CL-415, Grumman S-2 Tracker, Dash-8 Q400 and Beechcraft King Air 200. The fleet of helicopters used, including for firefighting, consists of EC-145 helicopters [25, 30].

After the fire in the Notre-Dame Cathedral, when DJI Matrice-210 and Mavic Pro UAVs were used to optimize firefighting, the practice of further use of drones during firefighting is being implemented.

Germany currently uses only helicopters for aerial firefighting. For this purpose, they are equipped with external water tanks of various sizes. Smaller helicopters, such as the Airbus H-135, carry about 500 liters; Larger models, such as the Airbus Super Puma operated by the German Federal Police or the rather large Sikorsky C-53 operated by the German armed forces, carry 2,000 L and 5,000 L, respectively [31, 32].

In order to be prepared for any large-scale fires in forest ecosystems, the European Commission in 2021 created a European fleet of 11 firefighting aircraft and 6 helicopters deployed in Member States as part of the rescEU mechanism. The Commission also set out guidelines for Member States to strengthen their measures to prevent fires. The rescEU firefighting aviation consists of planes and helicopters from six EU member states:

2 firefighting planes from Croatia;
2 firefighting planes from Greece;
2 firefighting planes from Italy;
2 firefighting planes from Spain;
2 firefighting planes;
6 firefighting helicopters from Sweden;
one firefighting plane from France.

The EU provides a coordinated approach to prevent, prepare for and respond to forest fires when they exceed national firefighting capabilities. The capabilities of the rescEU system are also available to other European countries that can request assistance in using firefighting aircraft to fight forest fires.

In the near future, the rescEU air fleet will be expanded with optimization of its placement on the territory of Europe. The European Commission finances up to 90% of the costs of purchasing and maintaining new helicopters and airplanes. The EU also covers 75% of transport and deployment costs. An amount of about 200 million euros per year is allocated for this purpose. The aviation fleet of the rescEU system is planned to be increased and fully formed by 2025 [33, 34].

One of the most important tasks of the aviation of the Ministry of Emergency Situations of Russia is the implementation of special aviation operations to extinguish natural and man-made fires. Russia has one of the largest parks of fire-fighting state aviation, which includes aircraft (Be-12P-200, An-32P, Il-76TDP, Be-200, Be-200ChS [35]) and helicopters (Mi-6P, Mi-

6PZh2, Mi-8 LT, Mi-14 Eliminator, Mi-26TP, Ka-32A [36]. In 2020, the AVIC AG600 amphibious aircraft made its first flight, which still has no analogues in the world and surpassed the Japanese US-2 and the Russian Be-200 in terms of its characteristics. In the official characteristics of the aircraft, it is indicated that it can take in 12 tons of water in 20 seconds, as well as extinguish an area of 4,000 m² with one discharge of water [37, 38].

On the basis of the conducted analysis, it is possible to draw a conclusion about the state of aviation firefighting in the countries of the world. It should be noted that the fleet of firefighting aviation or aviation used for extinguishing fires consists of various types of aircraft and helicopters, which are used depending on the ecosystem for the prompt elimination of fires arising in ecosystems for various reasons.

New technical possibilities for aerial firefighting in various ecosystems, including artificial ecosystems, have appeared in parallel with the development of unmanned aircraft. Thus, fire services in a number of American cities send UAVs to the scene of a fire, using them as scouts. The French fire service actively uses drones to monitor fires. After UAVs appeared in the arsenal of firefighting teams in Germany, they began to perform aerial monitoring of fires and other emergency situations in various ecosystems [39]. Drones help to coordinate the work of all rescuers and to cope with the fire in a shorter time, and also, which is very important, to save water. With traditional extinguishing methods, it is used in much larger volumes [40].

In addition to a number of useful functions [41] that rely over time on unmanned aviation in the field of civil protection, a fire extinguishing function has been added. This direction is actively developing in China, where UAVs are considered a key component of modern firefighting arsenals. Solving the problem of fire extinguishing in apartments or offices located in high-rise buildings has found its solution by using UAVs to raise fire hoses into the air to the required height. So, firefighters in the Chinese city of Chongqing used an unmanned aerial vehicle and extinguished a 10-story building in 15 minutes. At the same time, drones have a battery life of 20 minutes. With the help of several helicopter-type UAVs, fire hoses were raised to the top of the flame, which allowed it to be gradually extinguished [41, 42].

The Chinese company EHang, which specializes in the development of drones, presented the EHang 216F copter-type UAV, capable of flying for 1-2 minutes. raise to a height of 600 m up to 150 l of water (foam) or foam and act as a powerful fire extinguisher. A long gun barrel is installed on board the UAV, and there is a six-charge launcher above the cockpit. The incendiary bombs fired from this device are capable of piercing the glass of a building with a special hard alloy tip. The drone has a laser pointer and a camera. It is designed for semi-autonomous operation - the process of fighting fire is managed by the pilot-operator, while the UAV stays in position independently according to the program. The drone is capable of operating at heights of up to 600 m [43].

Extinguishing fires from the air in forest ecosystems is a very difficult and dangerous operation. This is due to the fact that smoke from a fire greatly impairs visibility, and hot air from a fire impairs controllability of an airplane or helicopter and can disrupt the operation of engines. At the same time, pilots must fly over the fire as low as possible to effectively dump the water (solution). To extinguish forest fires, the Chinese company QilingUAV has developed a helicopter-type UAV JS260. The device can carry two containers filled with fire extinguishing liquid weighing up to 100 liters. According to the developers, the volume of each tank is enough to extinguish 50 m³ of forest area [44].

In 2017, the Spanish company Singular Aircraft began production of Flyox Mark I and Mark II heavy unmanned seaplanes. The Flyox Mark II seaplane can be used for firefighting. It is equipped with a capacity of 2 tons of water, and is also able to receive water in the container in the gliding mode, and then dump the water at the site of the fire [45].

Another direction in the development of aerial firefighting, although not entirely new, is the use of special aviation means of firefighting - bombs. Thus, during the USSR at the end of the 80s of the 20th century. such a tool was developed - ASP-500 - a bomb in a plastic case containing 400 kg of a water mixture for extinguishing a fire. Upon hitting the surface, a special charge sprays a mixture that instantly extinguishes the flame on an area of about 1,000 m². The use of such bombs even in urban ecosystems was envisaged. It is important to note that firefighting specialists have developed a combined fire extinguishing technology using ASP-500. At first, the bombers were supposed to practice, which with the help of ASP-500 were supposed to shoot down the flames, and after them the Il-76 and Be-200 planes were supposed to drop water (solution) on this area. And, finally, the Mi-26TP, Mi-8LT and KA-32P helicopters were to finally eliminate the remains of the fire by spot dropping water (solution). Under conditions of good organization, according to experts, even with several echelons of such carpet fire extinguishing, which gives a 100% result, according to calculations, it would be possible to quickly extinguish fires in large-scale ecosystems [46].

In 2021, a bomb for aerial firefighting was tested in China. The weight of such a bomb is 200 kg. The bomb was successfully dropped on the training ground from a height exceeding 2,000 m with the TB-001 UAV, which is capable of lifting a payload of up to 1 ton. According to experts, one such bomb is capable of extinguishing a fire in an area of up to 450 m² [47].

At the end of 2019, the Israeli company Elbit Systems conducted tests of a new means of extinguishing fires, thanks to which aircraft will be able to extinguish fires on the surface of the earth from a greater height and in night conditions. The Israeli development is thin-walled bags filled with water, foam or fire retardant. The new fire extinguisher can be used on any aircraft or helicopter equipped with a water tank and a discharge system [45].

The above technical aspects of modern firefighting from the air provide grounds for a comparative analysis

of the situation with aviation firefighting that takes place in Ukraine.

The firefighting aviation of the State Emergency Service is represented by the Special Aviation Detachment of the Operational Rescue Service of the State Emergency Service, which is stationed at the airfield near the city of Nizhyn in the Chernihiv region, which is equipped with specialized firefighting aircraft An-32P (the weight of the fire-fighting mixture is 8 thousand kg) and a number of modifications of helicopters We-8 of Soviet production, which can use special equipment for extinguishing fires. The results of the involvement of An-32P firefighting aircraft for the elimination of forest fires in the "Chernobyl Exclusion Zone" ecosystem in 2020, as well as the elimination of large-scale fires in forest ecosystems on the territory of Ukraine in the past years, testify to the insufficient number of firefighting aircraft in the composition of the State Emergency Service for operational and effective solution of firefighting tasks from the air [48].

In Ukraine, the private aviation company "Ukrainian Helicopters" operates, which leases Mi-8MTV-1 helicopters and can participate in aerial firefighting, as happened during the fire in Turkey in 2021 [49].

There are a number of proposals for the development of firefighting aviation in Ukraine. One of them is to develop systems similar to the Russian VAP/VAP-2, for their possible installation on Il-76 type aircraft, which are in service with the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. This path is problematic, which is due to the small remaining resource of Il-76 aircraft existing in Ukraine - within 5-8 years [48].

As another way, it is proposed to start work on the creation of a heavy firefighting aircraft based on the An-70/77. According to projected figures, the cost of such an aircraft may reach \$160-170 million US [48], which requires significant foreign investment. At present, countries usually purchase ready-made firefighting aircraft.

So, for example, one CL-415 amphibious firefighting aircraft purchased for the European rescEU system costs up to 40 million euros [33]. In this regard, it is very difficult to expect investment in Ukraine in the interest of creating a new firefighting aircraft.

The essence of another proposal lies in the organizational plane - the creation of a general system of management of available aviation resources when extinguishing fires in forest ecosystems of Ukraine, including various departmental affiliations [8].

The paper [50] gives an idea regarding the prospective use of airships for aerial firefighting with a proposal to conduct scientific research to substantiate the implementation of such an approach in Ukraine.

The proposal for the creation of an international association of fire aviation with the participation of Ukraine, which could become a coordinating body for the management of fire aviation units of different countries in the interests of joint work in countries where large-scale fires have occurred, is set out in [48]. This, according to the authors, could contribute to obtaining an order for Ukraine for the production of heavy firefighting aircraft, taking into account the fact that our country is one of the few countries in the world where heavy and super heavy transport aircraft can be created. This proposal echoes the position of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine regarding the creation of a European hub of aviation security, for which it is necessary to "increase the aircraft fleet of the State Emergency Service, namely to double the number of AN-32P aircraft" [51].

Considering the creation of the rescEU system on the territory of the EU, it makes sense for Ukraine to join it, which, in our opinion, will strengthen our country's efforts towards European integration.

The analysis of the given proposals shows that the direction related to the development of unmanned aviation in the interests of aerial firefighting in natural and artificial ecosystems still remains at the level of ideas, although it requires active promotion in Ukraine [52], which has a number of aviation enterprises [53], able to solve such tasks under financing conditions.

Conclusions

Analysis of the technical aspects of aviation firefighting in ecosystems based on the experience of a number of foreign countries showed that there is a problem of protecting both natural and artificial ecosystems from fires that arise both as a result of natural factors and as a result of human activity. In parallel with the mentioned problem, there is the problem of aviation firefighting, especially in forest ecosystems in conditions of coverage of large areas by fires.

The experience of foreign countries indicates the need for the active development of aviation firefighting by creating an aviation triad:

manned aircraft,

helicopters and unmanned aircraft,

creating joint aviation structures to optimize the processes of firefighting from the air,

as well as by searching for and using the latest technologies.

Prospects for further research

The directions of further research should be the development of the latest and scientifically based technical solutions with their further implementation in the infrastructure of aviation firefighting in Ukraine.

REFERENCES

1. Difference between Natural and Artificial Ecosystem. Retrieved from: <https://biodifferences.com/difference-between-natural-and-artificial-ecosystem.html> [in English].
2. Order of the State Emergency Service On admission to operation of unmanned aerial vehicles. from November 20, 2018 № 675 <https://ips.ligazakon.net/document/FN047759> [in Ukrainian].
3. Order of the State Emergency Service On amendments to the order of the State Emergency Service of November 20, 2018 № 675. from February 8, 2019 №92 <https://www.dsns.gov.ua/ua/Nakazi/89229.html> [in Ukrainian].

4. Aviakompaniia «Ukrainski vertoloty» napravyla 4 helikoptery do Turechchyny dlia dopomohy u hasinni lisovykh pozhezhi [Ukrainian Helicopters has sent 4 helicopters to Turkey to help put out forest fires] Retrieved from: https://lb.ua/news/2021/08/05/491053_aviakompaniya_ukrainski.html [in Ukrainian].
5. Monitorynh lesnykh pozharov s BPLA [UAV monitoring of forest fires] Retrieved from: <https://www.alb.aero/about/articles/monitoring-lesnykh-pozharov-s-bpla> [in Russian].
6. How Firefighters Can Better Manage Emergency Situations : Using Drones. Retrieved from: <https://flytnow.com/drone-fire-fighting> [in English].
7. Propozytsii rozvytku pozhezhnoi aviatsii Ukrainy [Proposals for the development of firefighting aviation in Ukraine]. Retrieved from: <https://mil.in.ua/uk/blogs/propozytsiyi-rozvytku-pozhezhnoyi-aviatsiyi-ukrayiny> [in Ukrainian].
8. Mikosianchuk O. O., Khalmuradov B. D., Kichata N. M., Nabylska A. I. Orhanizatsiini aspekty zastosuvannia aviatsiinykh syl dlia hasinnia lisovoi pozhezhi [Organizational aspects of the use of air forces to extinguish a forest fire]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 1(63), 138-141 [in Ukrainian].
9. Mosov S. Bezpilotnyky – zhyttievo vazhlyvyi robotyzovanyi instrument suchasnosti [Drones are a vital robotic tool of our time]. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka*, 6, 14-15 [in Ukrainian].
10. Bychenko A., Maladyka I. Varhatiuk R. Zastosuvannia BPLA pid chas hasinnia pozhezhi [Use of UAVs during firefighting]. *Mizhnarodna nauk.-prakt. konf. «Teoriia i praktyka hasinnia pozhezhi ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii» Cherkasy: ChIPB NUTsZU*, 74-75 [in Ukrainian].
11. Jin H. Firefighter Drones 2022: Top Full Guide For You. Retrieved from: <https://lucidcam.com/firefighter-drones> [in English].
12. Stein-Janney T. Airtankers, an historic overview. *California Fire Pilots Association*, 1, 14 [in English].
13. Briukhanov A. V., Korshunov N. A. Avyatsyonnoe tushenye pryrodnykh pozharov: istoriya, sovremennoe sostoianye, problemy y perspektyvy [Aviation firefighting: history, current status, problems and prospects]. *Sybyrskiy lesnoi zhurnal*, 5,37-54 [in Russian]
14. Talykov N., Shubniakov E, Slutskiy H. YI-76 i druhye protyvopozharnye «bombardirovshchyky» [IL-76 and other fire-fighting "bombers"]. Retrieved from: <http://aviahistory.ucoz.ru/index/0-249> [in Russian].
15. Canadair CL-215. Retrieved from: <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/canadair-cl-215> [in English].
16. Roslynniyi svit i roslynni resursy. Natsionalnyi atlas Ukrainy [Flora and plant resources / National Atlas of Ukraine]. Retrieved from: <http://wdc.org.ua/atlas/4110100.html> [in Ukrainian].
17. Odynets A., Neseniuk L. Osnovni tendentsii pozhezhi i prychny yikh vynykнення v Ukraini v pershomu pivrichchi 2021 roku [The main trends of fires and their causes in Ukraine in the first half of 2021]. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka*, 8, 3-5 [in Ukrainian].
18. Ahlgren L. Boeing 747 Supertanker - The Worlds Largest Fire-Fighting Plane. Retrieved from: <https://simpleflying.com/boeing-747-supertanker/> [in English].
19. Planes. Retrieved from: <https://www.fs.usda.gov/managing-land/fire/planes> [in English].
20. The Chinook 47 – Worlds Largest Fire-Fighting Helicopter. Retrieved from: <https://topanganewtimes.com/2021/05/07/the-chinook-47-worlds-largest-fire-fighting-helicopter/> [in English].
21. Helicopter Specifications: S-64 Skycrane. Retrieved from: <https://www.fairlifts.com/helicopters/helicopter-specifications-s-64-skycrane/> [in English].
22. Bell 212 HP. Retrieved from: <https://aerotechteam.com/fleet/bell-212-hp> [in English].
23. The Bell 412 Relentlessly Fighting Fires around the Globe. Retrieved from: <https://www.optima-aero.ca/news-info/the-bell-412-relentlessly-fighting-fires-around-the-globe/> [in English].
24. LAFD Helicopter Crew Quell Outside Fire Threatening Large Northridge Home – NBC Los Angeles. Retrieved from: <https://us.newschant.com/us-news/los-angeles/lafd-helicopter-crew-quell-outside-fire-threatening-large-northridge-home-nbc-los-angeles> [in English].
25. Langfield M. Aerial firefighting resources in Europe. Retrieved from: <https://www.airmedandrescue.com/latest/long-read/aerial-firefighting-resources-europe> [in English].
26. Saab supplying Sweden with firefighting capabilities, c308027 [in English].
27. Pozharnaia avyatsiia v Izrayle [Israeli fire aircraft]. Retrieved from: <https://oleggranovsky.livejournal.com/271037.html>. [in Russian].
28. About Bambi Bucket. Retrieved from: <https://www.sei-ind.com/products/bambi-bucket/> [in English].
29. New fire fighting scooper aircraft to be delivered in next few months. Retrieved from: <https://greekcitytimes.com/2021/12/20/new-fire-fighting-scooper-aircraft-to-be-delivered-in-next-few-months/> [in English].
30. Eurocopter EC 145. Retrieved from: https://www.aerospace-technology.com/projects/eurocopter_ec145/ [in English].
31. Firefighting aircraft and helicopters: The flying fire brigade. Retrieved from: <https://aeroreport.de/en/aviation/firefighting-aircraft-and-helicopters-the-flying-fire-brigade#> [in English].
32. German fire brigades call for military helicopters over wildfire risks. Retrieved from: <https://www.dw.com/en/german-fire-brigades-call-for-military-helicopters-over-wildfire-risks/a-48467564> [in English].
33. EU sets up fleet to combat forest fires. Retrieved from: <https://www.dw.com/en/eu-sets-up-fleet-to-combat-forest-fires/a-49689721> [in English].
34. European aircraft fleet for the 2021 forest fire season. Retrieved from: <https://www.cde.ual.es/en/european-aircraft-fleet-for-the-2021-forest-fire-season/> [in English].
35. Pozharnye samolety i avyatsiia v MChS Rossyy: osnovnye modely y ykh LTKh [Firefighting aircraft and aviation in the EMERCOM of Russia: main models]. Retrieved from: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/pozharnye-samoletyi/> [in Russian].
36. Pozharnaia avyatsiia Rossyy. Pozharnye vertolety [Fire aviation of Russia. Fire helicopters]. Retrieved from: <https://khoroshevskiy.mos.ru/ads/detail/5238095.html> [in Russian].
37. Langfield M. Aerial firefighting in the Asia-Pacific region. Retrieved from: <https://www.airmedandrescue.com/latest/long-read/aerial-firefighting-asia-pacific-region> [in English].

38. Spruce T. Bell Helicopter delivers four firefighting aircraft to China. Retrieved from: <https://www.helicopterinvestor.com/articles/bell-helicopter-delivers-four-firefighting-aircraft-china-019/> [in English].
39. Mosov S. Bezpilotnyky – zhyttievo vazhlyvyi robotyzovanyi instrument suchasnosti [Unmanned aerial vehicles are a vital tool of robotic life]. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka*, 6, 12-15 [in Ukrainian].
40. Ispolzovanye dronov dlia monytorynha pozharoopasnykh raionov [Using drones to monitor fire hazardous areas]. Retrieved from: <https://4vision.ru/articles/ispolzovanie-dronov-dlya-monitoringa-pozharoopasnykh-rayonov.html> [in Russian].
41. Mosov S. P., Khyzhniak V. V., Lytovchenko A. O., Yadchenko D. M. Klyasifikatsiia, funktsii ta zavdannia bezpilotnoi aviatsii v sferi tsyvilnoho zakhystu Ukrainy [Classification, functions and tasks of unmanned aerial vehicles in the field of civil defense of Ukraine]. *Naukovyi visnyk: tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2(12), 54-68 [in Ukrainian].
42. Drony v Kytae ispolzovaly dlia tusheniya pozhara [Drones in China used to extinguish a fire]. Retrieved from: <https://quadro.news/15815-drony-v-kitae-ispolzovalis-dlya-tusheniya-pozhara.html> [in Russian].
43. Kitai vypustyl bespilotnyk dlia tusheniya pozharov v vysotkakh [China launches drone to fight high-rise fires]. Retrieved from: <https://ru.armeniasputnik.am/world/20200802/23967189/Kitay-vypustil-bespilotnik-dlya-tusheniya-pozharov-v-vysotkakh.html> [in Russian].
44. Kytaitsy razrabotaly pozharnyi dron [China has developed a fire drone]. Retrieved from: <https://nplus1.ru/news/2020/03/23/qilinguav> [in Russian].
45. Sychev V. Izraylitiane uspytaly protyvopozharnye avyatsyonnye kapytoshky [Israelis tested fire-fighting aircraft caps]. Retrieved from: <https://nplus1.ru/news/2020/01/22/pellets> [in Russian].
46. Avyatsyonnoe sredstvo pozharotusheniya – ASP-500 razrabatyvalos eshche v SSSR [Aviation fire extinguishing agent - ASP-500 was developed in the USSR]. Retrieved from: <https://every-news.com/post/56461285-aviacionnoe-sredstvo-pozharotusheniya-asp-500-razrabatyvalos-eshche-v-sssr-v-samom> [in Russian].
47. Lykvydyruet 450 kv. metrov ohnia: v Kytae uspytaly avyabombu dlia tusheniya pozharov [Eliminates 450 sq. meters of fire: China tested an aerial bomb to extinguish fires]. <https://focus.ua/voennye-novosti/500211-likvidiruet-450-kv-metrov-ognya-v-kitae-ispytali-aviabombu-dlya-tusheniya-pozharov-video> [in Russian].
48. Propozytii rozvytku pozhezhnoi aviatsii Ukrainy [Proposals for the development of firefighting aviation in Ukraine]. Retrieved from: <https://mil.in.ua/uk/blogs/propozytii-rozvytku-pozhezhnoyi-aviatsii-ukrayiny/> [in Ukrainian].
49. Aviakompaniia «Ukrainski vertoloty» napravyla 4 helikoptery do Turechchyny dlia dopomohy u hasinni lisovykh pozhezh [Ukrainian Helicopters has sent 4 helicopters to Turkey to help put out forest fires]. Retrieved from: <https://tsn.ua/svit/aviakompaniya-ukrayinski-vertoloti-napravila-4-gelikopteri-do-turechchini-dlya-dopomogi-u-gasinni-lisovih-pozhezh-1840345.html> [in Ukrainian].
50. Kirienko M. M., Kalashnyk N. V., Cherepnov I. A., Makohon O. A. Zastosuvannia pilotovanykh i bezpilotnykh dyryzhabliv dlia hasinnia lisovykh pozhezh [Use of manned and unmanned airships to extinguish forest fires]. *Mizhn. Nauk.-prakt. konf. «Molod i tekhnichnyi prohres v APV»*. Kharkiv: KhNTUSH, 339-342 [in Ukrainian].
51. Ministr vnutrishnikh sprav anonsuvav stvorennia yevropeiskoho khaba aviatsiinoi bezpeky [The Minister of the Interior announced the creation of a European aviation security hub]. Retrieved from: <https://mvs.gov.ua/uk/press-center/news/ministr-vnutrisnix-sprav-anonsuvav-stvorennia-jevropeiskogo-xaba-aviatsiinoi-bezpeky> [in Ukrainian].
52. Mosov S. Stvorennia systemy bezpilotnoi aviatsii u skladi DSNS – aktualne pytannia sohodennia [The creation of an unmanned aerial vehicle system within the SES is a topical issue today]. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka*, 10, 16-19 [in Ukrainian].
53. Aviatsiina i aerokosmichna promyslovist Ukrainy [Aviation and aerospace industry of Ukraine]. Retrieved from: <http://ukrexport.gov.ua/uk/prom/ukr/30.html> [in Ukrainian].

Received (Надійшла) 29.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.08.2022

Технічні аспекти авіаційного гасіння пожеж в екосистемах: досвід зарубіжних країн

С. Мосов, О. Горський

Анотація. У статті розглянуто технічні аспекти авіаційного гасіння пожеж в екосистемах на основі досвіду провідних країн світу. Розкрито особливості природних і техногенних екосистем у площині гасіння пожеж. Уточнюється обумовленість виникнення потреби в авіаційному пожежогасінні, перш за все, існуючими особливостями екосистем, а також наявним рівнем технічного розвитку та можливостями пілотованої авіації щодо оперативного виконання завдань пожежогасіння в екосистемах. Досліджено стан пожежної авіації США та Канади, країн Європи, Китаю та інших країн, а також інфраструктурні особливості організації гасіння пожеж з повітря. За результатами дослідження зазначено, що парк пожежної авіації або авіації, яка залучається до гасіння пожежі, складається з різних типів літаків і вертольотів, які використовуються в залежності від екосистем для швидкої ліквідації пожежі, що виникла в екосистемі. Акцентовано увагу на перспективах створення авіаційних засобів пожежогасіння на базі безпілотної авіації, яка розвивається лавиноподібно та дозволяє оптимізувати пожежогасіння в різних екосистемах. Привертає увагу напрямок розробки, хоч і не зовсім новий, але корисний, суть якого полягає у використанні авіаційних засобів пожежогасіння у вигляді спеціальних бомб на прикладі Росії, Китаю та Ізраїлю. Проаналізовано стан протипожежного авіаційного флоту України. Досліджено пропозиції технічного та організаційного характеру подальшого розвитку пожежогасіння з повітря в Україні. Аналіз наданих пропозицій показав, що напрямок, пов'язаний із розвитком безпілотної літальної апаратури пожежогасіння в природних та штучних екосистемах України, поки що залишається на рівні ідей, але потребує подальшого просування в нашій країні, яка має низку авіаційних підприємств, здатних за умов необхідного фінансування успішно вирішувати наступні завдання. У висновках акцентується увага на тому, що розглянуті напрями розвитку пожежної авіації в Україні здебільшого знаходяться на рівні ідей, які мають бути, насамперед, науково обґрунтованими. Напрямами подальших досліджень слід вважати розробку новітніх та науково обґрунтованих технічних рішень з подальшим їх впровадженням в інфраструктуру авіаційного пожежогасіння України.

Ключові слова: екосистема, пожежа, авіаційне пожежогасіння, пожежна авіація.

В. М. Триснюк, Є. І. Нагорний, Т. В. Триснюк, О. О. Конецька, А. В. Курило

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

МЕТОДИКА ВИЯВЛЕННЯ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ МІСЦЕВОСТІ ТА ЙОГО РИЗИКІВ

Анотація. Питання безперервного контролю радіаційної обстановки (РО) і своєчасного виявлення радіоактивного забруднення місцевості (РЗМ) продовжують залишатися актуальними і нині. **Актуальність теми** обумовлена вимогами перспективних автоматизованих систем контролю радіаційної обстановки і АСУ по скороченню часу обробки даних про радіоактивне забруднення місцевості і підвищенню достовірності результатів виявлення радіаційної обстановки. Виявлення радіоактивного забруднення місцевості за даними радіаційної розвідки, призначений для виявлення радіоактивного забруднення місцевості за даними радіаційної розвідки і може враховувати апіорну інформацію про джерела забруднення і стану довкілля з подальшим відображенням результатів виявлення на об'єктах відображення інформації. **Метою статті** є формулювання постановки задачі ліквідації наслідків техногенних катастроф на території України, користуючись принципами системного підходу. **Результати дослідження.** У статті сформульована постановка задачі ліквідації наслідків техногенних катастроф на території України. Запропоновано методику і алгоритм обробки інформації про радіоактивне забруднення місцевості при виявленні радіаційної обстановки з урахуванням апіорної інформації про джерела радіоактивного забруднення місцевості, яка дозволяє підвищити достовірність і оперативність виявлення фактичного радіоактивного забруднення місцевості. Розроблені методики і алгоритм можуть бути реалізовані в спеціальному математичному забезпеченні автоматизованих робочих місць різних посадовців в перспективних комплексних завданнях виявлення радіаційної обстановки при виникненні надзвичайних ситуацій. На наш погляд ця модель може використовуватися для складання прогнозу радіоактивного забруднення місцевості у тому разі якщо активна фаза розвитку ядерної реакції припиниться після викиду радіоактивних речовин в атмосферу.

Ключові слова: радіоактивне забруднення; техногенні катастрофи, радіоактивних речовин, ядерні енергетичні установки.

Вступ

Питання безперервного контролю радіаційної обстановки (РО) і своєчасного виявлення радіоактивного забруднення місцевості (РЗМ) продовжують залишатися актуальними і нині. Це обумовлено двома чинниками: збільшенням кількості об'єктів ядерної енергетики, як джерела дешовшої енергії, і активізацією сил міжнародного екстремізму та військових дій на території України. У разі загострення міжнародного стану не можна унеможливити масову атаку терористів на об'єкти атомної енергетики, підприємства ядерного паливного циклу, а також могильники радіоактивних відходів. Як показує практика, превентивні заходи захисту не завжди виявляються ефективними. Таким чином, можливе виникнення ситуації, коли значні території піддаються радіоактивному забрудненню одночасно від декількох джерел. Виявлення радіоактивного забруднення місцевості буде першим завданням ліквідації наслідків подібних ситуацій. **Метою статті** є формулювання постановки задачі ліквідації наслідків техногенних катастроф на території України, користуючись принципами системного підходу. Нині усі АЕС обладнані апаратурою, що забезпечує безперервний цілодобовий контроль скидань і викидів радіоактивних речовин в довкілля, сигналізацію перевищення в повітрі допустимих концентрацій, автоматичне, без участі оператора, фіксацію об'ємної активності радіонуклідів у воді і повітрі (інформаційно-вимірювальна система «Кільце», апаратура РКС-03-01, АК РБ-06 та ін.). Деякі АЕС частково обладнані датчиками, які досягли потужності дози гамма випромінювання порогового значення, авто-

матично включають прилади, що вимірюють сумарну активність ізотопів йоду, інертних радіоактивних газів (ИРГ) і потужність дози бета випромінювання. Отримана таким чином інформація передається по дротяних засобах зв'язку Радіоактивне забруднення місцевості є потужним чинником, що робить істотний вплив на життєдіяльність населення, роботу адміністративних структур і органів державного управління в цілому [1].

Джерелами радіоактивного забруднення в мирний час можуть бути:

аварії ядерних енергетичних установок з викидом продуктів реакції;

руйнування сховищ (контейнерів) з радіоактивними речовинами;

руйнування активної зони або системи теплоносія ядерних енергетичних установок в результаті терористичних актів;

руйнування могильників радіоактивних відходів.

Виклад основного матеріалу

У разі виявлення радіоактивного забруднення місцевості за фактичними даними через відсутність практично реалізованого програмного забезпечення для цих систем можна говорити лише про певні наукові опрацювання завдання. Деякі з причин такого стану справ очевидні. Ця невідповідність, в тому або іншому ступені, між фактичним РЗМ і модельним, неповна і неточна інформація про джерела радіоактивного забруднення, значні помилки визначення потужності дози випромінювання приладами радіаційної розвідки, великий об'єм оброблюваних даних, що мають розкид за часом вимірів.

Найважче математичне забезпечення для обробки інформації про РЗМ в автоматизованих системах контролю РО, на наш погляд, має істотний недолік. Апарат оцінки РЗМ в АСКРО створювався після аварії на Чорнобильській АЕС і тому значною мірою орієнтований на специфіку завдань, що вирішуються в системах контролю радіаційної обстановки. Виявлення і оцінка радіаційної обстановки здійснюється, як правило, в два етапи. На першому - на підставі даних про джерела радіоактивного забруднення і метеобстановку, здійснюється прогноз РЗМ. На другому - виявляється фактична радіаційна обстановка за даними розвідки (контролю). Результати прогнозу можуть бути використані тільки для орієнтовної оцінки радіаційної обстановки [2]. Необхідно особливо відмітити, що ці прогнозування повинні обов'язково уточнюватися радіаційною розвідкою [1].

Такий порядок роботи характерний як для систем контролю радіаційної обстановки, так і для систем військового. Завданням досліджень є виявлення і оцінка (за прогнозом і фактичними даними) масштабів і наслідків погіршення екологічної обстановки на контрольованій території і об'єктах [3]. Нині досить добре пропрацювали методи прогнозування радіоактивного забруднення місцевості при ядерних вибухах. Проте, ці підходи неприйнятні при виникненні надзвичайних ситуацій на об'єктах атомної енергетики і підприємствах ядерного паливного циклу. Це пов'язано з тим, що набір радіонуклідів, що забруднюють навколишній простір при аварії на АЕС, істотно відрізнятиметься від їх складу при ядерному вибуху. Так, при аварії ядерного енергетичного реактора довгоживучих радіонуклідів буде в 100-2200 разів більше, ніж при використанні ядерної зброї [4].

Крім того, принципово іншим буде процес поширення продуктів реакції. Це обумовлено: різною висотою підйому радіоактивних хмар з аварійного реактора і від ядерного вибуху; пульсуючим характером витікання радіоактивних речовин із зруйнованої зони ядерного реактора; нестабільністю метеопараметрів в приземному (пограничному) шарі атмосфери в порівнянні з високими шарами атмосфери, де відбувається поширення радіоактивної хмари ядерного вибуху.

Розглянемо модель поширення радіоактивної хмари в пограничному шарі атмосфери. Ця модель [5] дозволяє розрахувати потужність дози випромінювання на слідові радіоактивної хмари при аварії ядерного реактора.

У основу моделі покладені такі залежності.

$$\dot{X}_1 = \frac{(1 - 0.9\tau^{-0.18})W_{el}\eta R}{V^\beta X^\gamma} K_r \exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (1)$$

У формулі (1) присутні такі змінні:

X - потужність дози випромінювання на сліду радіоактивної хмари за годину після аварії на АЕС, Р/ч;

τ - тривалість компанії, діб (стандартна компанія ядерних реакторів РБМК і ВВЭР на території України близько трьох років або 1100 діб);

W_{el} - електрична потужність ядерного реактора, МВт; η - доля викиду радіоактивних речовин з ядерного реактора, % (якщо доля викиду невідома (типова ситуація в початковій стадії аварії), то вона приймається рівною 10%, причому для ядерних реакторів РБМК 25% викиду вважається хмарою, а 75% викиду - струміль, а для ядерних реакторів ВВЭР 75% викиду - хмара і 25% - струміль;

R - коефіцієнт, величина якого залежить від типу ядерного реактора і категорії стійкості атмосфери, значення R приведені в табл. 1;

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта R

Тип ядерного реактора	Категорія стійкості атмосфери		
	Конвекція (A)	Ізотермія (D)	Інверсія (F)
РБМК	0,01104	0,11435	0,17282
ВВЭР	0,00644	0,01421	0,03044

V - швидкість вітру в шарі 0-200 м, м/с;

X - відстань від аварійного ядерного реактора по напрямку вітру, км;

K_r - коефіцієнт, що враховує зменшення потужності дози на початковій ділянці сліду,

$$K_r = 0.5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{K_1} \ln \left(X / X_{50} \right) \right) \right], \quad (2)$$

для категорії стійкості атмосфери A і D $K = 1$, але його величину необхідно враховувати для категорії стійкості атмосфери F ;

$\operatorname{erf} \left(\sqrt{K_1} \ln \left(X / X_{50} \right) \right)$ - інтеграл імовірності (функція Лапласа);

X_{50} - відстань від АЕС до точки, в якій потужність дози випромінювання в два рази менше максимальної на осі сліду, км;

Y - відстань точки від осі сліду, км;

σ_y - дисперсія бічного відхилення сліду на відстані X км від АЕС,

$$\sigma_y = \frac{C_3 X}{\sqrt{1 + 0.1X}}, \quad (3)$$

C_3 - критерій Пасквилла, величина якого залежить від категорії стійкості атмосфери (табл. 2);

Таблиця 2 – Значення критеріїв Пасквилла

Категорія стійкості атмосфери	Конверсія	Ізотермія	Інверсія
C3	0,00644	0,01421	0,03044

γ - коефіцієнт, величина якого залежить від типу ядерного реактора, категорії стійкості атмосфери і швидкості вітру

$$\gamma = a - b \lg V. \quad (4)$$

Значення коефіцієнтів a і b , а також β , $\sqrt{K_1}$, X_{50} , величини яких залежать від типу ядерного реактора і категорії стійкості атмосфери, приведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів $a, b, \beta, \sqrt{K_1}, X50$

Тип ядерного реактора	Категорія стійкості атмосфери	a	b	β	$\sqrt{K_1}$	$X50$
РБМК-1000	A	1.75064	0.43463	1.27297	1.90623	27.958
	D	2.02097	0.59085	1.23651	1.90623	27.958
	F	2.08716	0.36056	0.85016	1.90623	27.958
ВВЭР-1000	A	1.52343	0.33194	1.15853	1.90859	28.000
	D	1.76039	0.50074	1.24020	1.90859	28.000
	F	2.08914	0.35439	0.83993	1.90859	28.000

Зауважимо, що за відсутності даних величина $X50$ приймається рівною 27,958 для РБМК-1000 і 28,000 - для ВВЭР-1000 (табл. 3).

Знаючи значення потужності дози випромінювання в точці на сліді хмари на 1 годину після аварії можливо розрахувати рівень радіації на будь-який час

$$\dot{X}_t = \dot{X}_1 f(t), \quad (5)$$

де t - час з моменту зупинки ядерного реактора, ч.

У рамках розвитку цієї моделі [6] була запропонована методика розрахунку розподілу потужності дози випромінювання на сліді радіоактивної хмари.

У напрямі сліду розподіл потужності дози випромінювання визначається

$$\dot{X}_x = \frac{10^\alpha K \cdot K_W}{V^\beta X^\gamma}, \quad (6)$$

де K - коефіцієнт, величина якого залежить від типу ядерного реактора і стійкості атмосфери (табл. 4);

Таблиця 4 – Значення коефіцієнту K

Тип ядерного реактора	Категорія стійкості атмосфери		
	A	D	F
РБМК-1000	1,89180	2,90735	3,08670
ВВЭР-1000	1,65788	2,00169	2,33355

K_W - коефіцієнт, що враховує кількість аварійних ядерних реакторів (n), їх електричну потужність (W_{el} , МВт) і долю викиду радіоактивних речовин з ядерного реактора при аварії (%)

$$K_W = 10^{-4} n W_{el}, \quad (7)$$

Розподіл потужності дози випромінювання в напрямі перпендикулярному осі сліду описується таким рівнянням:

$$\dot{X}_{xy} = \dot{X}_x \exp\left(\frac{-Y^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (8)$$

де Y - відстань від осі сліду, км; σ_y^2 - дисперсія розподілу домішки в поперечному перерізі сліду хмари.

Проте критерій по Пасквиллу в даному випадку визначається інакше (табл. 5).

Таблиця 5 – Значення критеріїв Пасквилла

Категорія стійкості атмосфери	A	D	F
C3	0,22	0,08	0,04

Виходячи з вищевикладеного модель дозволяє визначити геометричні розміри зон радіоактивного забруднення місцевості.

Довжина зони забруднення

$$L_x = \sqrt{\frac{K_W \cdot K \cdot A \cdot 10^\alpha}{V^\beta \cdot \dot{X}_3}}. \quad (9)$$

Ширина сліду радіоактивної хмари

$$L_y = \sqrt{2\sigma_y^2 \left(\ln \dot{X}_{1/2L_x} - \ln \dot{X}_3 \right)}, \quad (10)$$

де L_x - потужність дози випромінювання на осі сліду на відстані $\frac{1}{2L_x}$ від АЕС на 1 годину після зупинки ядерного реактора;

\dot{X}_3 - потужність дози випромінювання на зовнішній межі визначуваної зони на 1 годину після аварії ядерного реактора;

A - добова доля радіонуклідів, що викидаються, від їх загальної кількості, %.

Як показує аналіз цієї моделі, запропонований алгоритм досить добре формалізований [7]. Проте в якості початкових даних є присутньою велика кількість змінних, значення яких невідоме, принаймні в початковий період розвитку аварії.

До таких параметрів відносяться:

доля викиду радіоактивних речовин з ядерного реактора;

відстань від АЕС до точки, в якій потужність дози випромінювання в два рази менше максимальної на осі сліду;

добова доля радіонуклідів, що викидаються, від їх загальної кількості (A) і деякі інші.

Привласнення невідомим параметрам моделі фіксованих значень, поза сумнівом, погіршує якість моделі в цілому.

Крім того, ця модель не враховує пульсуючий характер викиду радіоактивних речовин з аварійного реактора, що цілком імовірно, як показав досвід аварії на Чорнобильській АЕС.

На наш погляд ця модель може використовуватися для складання прогнозу радіоактивного забруднення місцевості у тому разі якщо активна фаза розвитку ядерної реакції припиняється після викиду радіоактивних речовин в атмосферу.

Висновки

Як показує аналіз цієї моделі привласнення невідомим параметрам моделі фіксованих значень, поза сумнівом, погіршує якість моделі в цілому.

Крім того, ця модель не враховує пульсуючий характер викиду радіоактивних речовин з аварійного реактора, що цілком імовірно, як показав досвід аварії на Чорнобильській АЕС.

На наш погляд ця модель може використовуватися для складання прогнозу радіоактивного

забруднення місцевості у тому разі якщо активна фаза розвитку ядерної реакції припиняється після викиду радіоактивних речовин в атмосферу [8].

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок про те, що методики прогнозування радіоактивного забруднення місцевості, що базуються на використанні модельних уявлень про формування сліду ядерного вибуху, непридатні відносно радіаційних аварій, або вимагають істотної переробки.

Інші методики, при обробці інформації про аварії на ядерних енергетичних установках, повинні враховувати радіонуклідний склад продуктів реакції.

Отриманий формальний опис досліджуваної системи і оточуючого її середовища, виходячи із принципів системного підходу.

Напрямок подальших досліджень – використання методів інтерполяції для обробки даних радіаційної розвідки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України "Про Цивільну оборону України" від 28.02.1991 р.
2. Триснюк В.М. Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. Системи обробки інформації. –2016. –№12. – С.185-188. Index Copernicus
3. Белов П.Г. Моделирование опасных процессов в техносфере: Методическое пособие. – К.: КМУГА, 1999. – 124 с.
4. Загальні вимоги до розвитку і розміщення потенційно небезпечних виробництв з урахуванням ризику надзвичайних ситуацій техногенного походження/ НАН України, Рада по вивченню продуктивних сил України. Наукові керівники: чл.-кор. НАН України С.І. Дорогунцов і генерал-лейтенант В.Ф. Гречанінов. – К., 1995. – 120 с.
5. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI (Редакція від 12.05.2017)
6. В.П.Романюк, В.М.Триснюк, Т.Л.Куртсеїтов. Постановка задач ліквідації наслідків природних та техногенних катастроф на території України.. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. Випуск 3 (61) 2020р. – С. 138-143.
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., Nikitin, A. [2018] Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. Centrul Universitar Nord Din Bala Mare - UTPRESS ISSN 1582-0548, №1. 61-67.
8. Михайлова А.В., Чумаченко С.М. Особливості класифікації джерел небезпеки, що призводять до надзвичайних ситуацій воєнного характеру // 36. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика», 21-22 листопада 2019, Харків, НУЦЗУ. – С. 51-53.

Received (Надійшла) 22.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

Statement of the consequence's liquidation problem of natural and technogenic disasters on the Ukraine territory

Vasyl Trysnyuk, Evgeny Nagorny, Taras Trysnyuk, Olha Konetska, Anatoly Kurilo

Abstract. The issues of continuous monitoring of the radiation situation (RO) and timely detection of radioactive contamination of the area (RZM) continue to remain relevant even today. The topicality of the topic is due to the requirements of promising automated systems for monitoring the radiation situation and ACS to reduce the time of processing data on radioactive contamination of the area and increase the reliability of the results of detecting the radiation situation. Detection of radioactive contamination of the area according to radiation reconnaissance data is intended for detection of radioactive contamination of the area according to radiation reconnaissance data and can take into account a priori information about the sources of pollution and the state of the environment with subsequent display of detection results on information display devices. The purpose of the article is to formulate the problem of elimination of the consequences of man-made disasters on the territory of Ukraine, using the principles of a systemic approach. Research results. The article formulates the formulation of the task of eliminating the consequences of man-made disasters on the territory of Ukraine. A methodology and algorithm for processing information about radioactive contamination of the area when detecting the radiation situation, taking into account a priori information about the sources of radioactive contamination of the area, which allows to increase the reliability and efficiency of detecting the actual radioactive contamination of the area, is proposed. The developed methods and algorithm can be implemented in the special mathematical provision of automated workplaces of various officials in promising complex tasks of detecting the radiation situation in emergency situations. In our opinion, this model can be used to make a forecast of radioactive contamination of the area in the event that the active phase of the development of the nuclear reaction stops after the release of radioactive substances into the atmosphere.

Keywords: radioactive pollution; man-made disasters, radioactive substances, nuclear power plants.

В. Д. Голь, А. Ю. Раківська, Д. Ю. Раківський

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ЗАСОБИ КІБЕРЗАХИСТУ НА РІВНІ МЕРЕЖНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація. У статті проаналізовано та запропоновано концептуальні засади впровадження організаційно-технічної моделі кіберзахисту, призначення та цілі. Розглянуто архітектуру організаційно-технічної моделі кіберзахисту, яка є структурованою системою, що складається з трьох інфраструктур кіберзахисту, а саме: організаційно-керуючої інфраструктури кіберзахисту, як сукупності суб'єктів забезпечення кібербезпеки, що формують та реалізують державну політику у сфері кібербезпеки; технологічної інфраструктури кіберзахисту, як сукупності сил та засобів кіберзахисту, а також інфраструктури, що забезпечує функціонування сил кіберзахисту, інформаційно-комунікаційних мереж та їх ресурсів, що використовуються в інтересах сил кіберзахисту та базисної інфраструктури кіберзахисту, як сукупності об'єктів критичної інформаційної інфраструктури, критичних активів, комунікаційних і технологічних систем, що віднесені до об'єктів критичної інфраструктури. Запропоновано виділити місце в організаційно-технічній моделі, яке буде об'єднувати в собі роботу та реалізацію засобів кіберзахисту на рівні мережної інфраструктури.

Ключові слова: кіберзагроза, система інформаційної безпеки, комплексна система захисту інформації, комплекс засобів захисту, об'єкти критичної інфраструктури.

Вступ

Постановка проблеми. Питання безпеки інформаційних систем державних органів влади наразі є одними з найбільш актуальних. Наразі потреба безпеки даних потребує конкретних рішень та заходів, адже окремі державні органи експлуатують інформаційно-телекомунікаційні системи всупереч вимогам законодавства. Саме впровадження в дію рівнів та використання властивостей організаційно-технічної моделі (ОТМ) забезпечить на організаційному, технологічному і базисному рівнях взаємодію між суб'єктами національної системи кібербезпеки, відповідними технічними підрозділами цих суб'єктів, які спираються на відповідну захищену інформаційну інфраструктуру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Організаційно-технічні побудови систем кібербезпеки різних країн розглядалися в національних стратегіях кібербезпеки, рекомендаціях ENISA, ITU, NATO. Робіт і досліджень доволі багато [1-14], але на даний час в Україні недостатньо досліджень саме з питань розбудови ОТМ кіберзахисту (ОТМК) та з розвитку національної системи кібербезпеки в цілому. Отже головною задачею в сфері комунікаційних мереж і спеціального зв'язку стає розробка концептуальних засад формування та впровадження ОТМ кіберзахисту України.

Метою статті є проведення аналізу та дослідження принципу роботи і використання організаційно-технічної моделі кіберзахисту, ґрунтуючись на застосуванні засобів мережного захисту.

1. Структура організаційно-технічної моделі кіберзахисту

Кіберзахист – сукупність організаційних, правових, інженерно-технічних заходів, а також заходів криптографічного та технічного захисту інформації, спрямованих на запобігання кіберінцидентам, вияв-

лення та захист від кібератак, ліквідацію їх наслідків, відновлення сталості і надійності функціонування комунікаційних, технологічних систем (Закон України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» від 5.10.2017 № 2163-VIII).

Вищезазначений Закон України визначає правові та організаційні основи забезпечення захисту життєво важливих інтересів людини і громадянина, суспільства та держави, національних інтересів України у кіберпросторі, основні цілі, напрями та принципи державної політики у сфері кібербезпеки.

Відповідно до [4-6] одним з шляхів забезпечення функціонування національної системи кібербезпеки є впровадження організаційно-технічної моделі (ОТМ) національної системи кібербезпеки як комплексу заходів, сил і засобів кіберзахисту, спрямованих на оперативне реагування на кібератаки та кіберінциденти, впровадження контрзаходів, спрямованих на мінімізацію вразливості комунікаційних систем. Місія ОТМК – через розвиток зрілості (maturity) національної системи кібербезпеки забезпечити її стійкість (resilience) задля безпечного та сталого функціонування українських об'єктів критичної інфраструктури, систем надання електронних послуг, інформаційної інфраструктури, нейтралізації кібератак. Завдана шкода від атак щоразу зростає в геометричній прогресії, що змушує компанії вживати нових заходів кіберзахисту. Саме тому заступник Голови Держспецзв'язку Олександр Потій пояснив, що якщо розглядати кіберзахист як цілеспрямовану діяльність із забезпечення безпеки кіберпростору, то необхідно визначити структуру такої діяльності, суб'єкти кіберзахисту, цілі кіберзахисту та відповідну інфраструктуру, яка цю діяльність буде підтримувати [4]. На основі посилення рівня захисту кібернетичної системи була презентована «Організаційно-технічна модель кіберзахисту» ([4], яка складатиметься з трьох вертикально та горизонтально інтегрованих інфраструктур (рис. 1).

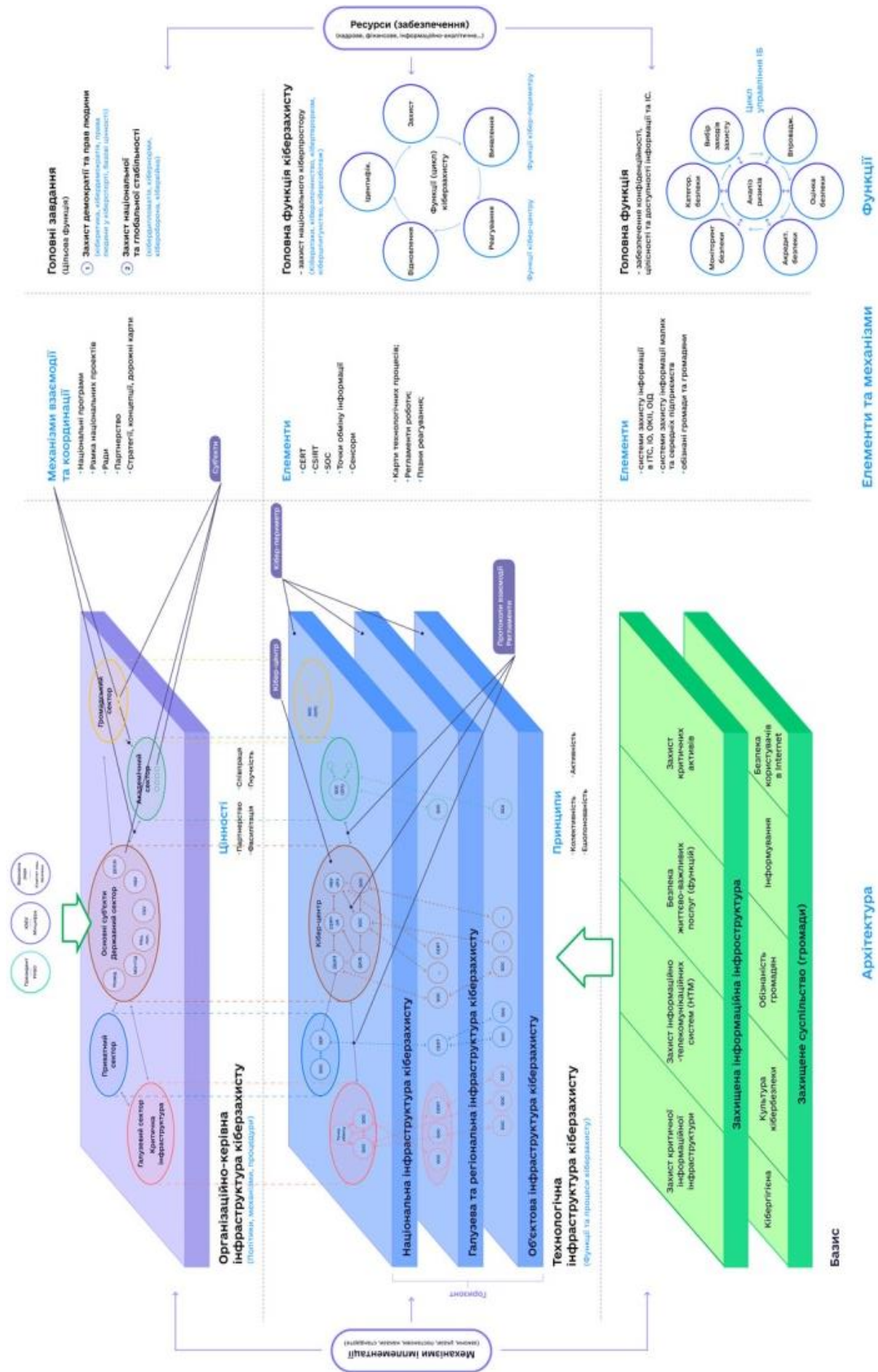


Рис. 1. Організаційно-технічна модель кіберзахисту (джерело [4])

Технологіями та засобами кіберзахисту, які використовуються для реалізації ОТМК, є системи виявлення вразливостей і реагування на кіберінциденти та кібератаки, інформаційні технології, технічні, програмні та програмно-апаратні засоби (пристрої, обладнання, комплекси), які використовуються в інтересах забезпечення кіберзахисту державних інформаційних ресурсів, комунікаційних та технологічних систем, а також об'єктів критичної інформаційної інфраструктури [4]. Сфера впровадження заходів на цьому рівні притаманна спеціалістам з телекомунікаційних систем. Головним завданням технологічної інфраструктури є оперативний та ефективний захист кіберпростору в частині протидії кібератакам, кіберзлочинам, кібертероризму, кібершпигунству, а також забезпечення кібероборони та кіберрозвідки, в т.ч. через [5]:

- збір, аналіз, оцінювання, узагальнення та поширення інформації про інциденти;
- допомогу іншим суб'єктам кіберзахисту у випадку кіберінцидентів;
- взаємне інформування суб'єктів кіберзахисту про нові загрози;
- створення умов для відповідального та довіреного обміну інформацією між суб'єктами кіберзахисту всіх секторів кіберзахисту. Реалізація цього завдання ґрунтується на впровадженні на всіх рівнях циклу функцій кіберзахисту який включає:
 - ідентифікацію – визначення користувачів та ресурсів, оцінки ризиків, оцінки вразливостей, каталогізації національних електронних інформаційних ресурсів та визначення об'єктів (активів), що підлягають кіберзахисту;
 - захист – контроль доступу, захисту даних (конфіденційність, цілісність, доступність), опис процесів та процедур, захисту від атак, технічної підтримки, тренування персоналу;
 - виявлення – збір подій та виявлення аномалій, моніторинг інцидентів безпеки, побудова процесу детектування та обміну інформацією;
 - реагування – аналіз інцидентів безпеки, оцінки їх наслідків, протидії та блокуванню засобами захисту, покращення системи захисту;
 - відновлення – відновлення після кібератаки, забезпечення проведення відповідного їх розслідування, розробки та забезпечення реалізації заходів щодо вдосконалення системи кіберзахисту та підвищення рівня кібербезпеки. [6]

В роботі ОТМК застосовуються різні рівні моделі OSI, прикладний, фізичний, мережний. В обслуговуванні задіяні фахівці з галузі телекомунікацій, які керують процесами відповідно до кожного рівня базової структури.

Перший рівень – це організаційно-керуюча інфраструктура кіберзахисту. Другий рівень – це технологічний рівень або технологічна інфраструктура кіберзахисту, яка складається з сукупності сил та засобів кіберзахисту. Третій рівень – це базисна інфраструктура кіберзахисту, що забезпечує основні спроможності кіберзахисту.

Механізми імплементації цієї моделі і ресурсне забезпечення – це два дуже важливі компоненти, які

охоплюють всі рівні архітектури. Механізм імплементації – це відповідні розробка і удосконалення нормативної бази шляхом прийняття відповідних законодавчих актів, нормативних актів, стандартів, наказів на всіх рівнях – з верхнього до нижнього рівнів управління» [14] Для реалізації моделі спеціалістами з телекомунікаційних мереж було запропоновано виділити місце в ОТМК, яке буде об'єднувати в собі роботу та реалізацію засобів кіберзахисту на рівні мережної інфраструктури.

2. Засоби захисту мережної інфраструктури

Розглянемо більш детально засоби захисту мережної інфраструктури, що пропонуються для ОТМК на рівні мережної інфраструктури.

Cisco FirePOWER – це програмні послуги для платформи Cisco ASA. Особливості: негайне виявлення вірусів із зовнішніх мереж, виявлення спроб сканування ресурсів та структури внутрішньої мережі, повний контроль над гостьовими сервісами та підключеннями, визначення надійних політик захисту до та під час атак. Є потужним рішенням з управління мережними активами та їх вразливістю.

BlackBerry Cyber Suite пропонує забезпечення захисту в середовищі «з нульовою довірою» (Zero Trust), де кожна кінцева точка має забезпечити довіру та підтвердити її під час кожного події чи транзакції. Особливості: реалізація архетипних архітектурів Zero Trust для просування алгоритмів, працює на кінцевих точках усіх типів, використовуючи повне охоплення та краще розуміння поведінки дов, забезпечує безперервний моніторинг та виявлення загроз, щоб забезпечити цілісність даних, забезпечує постійну контекстно-залежну автентифікацію пристроїв, мереж, програм та людей, створює відкриту платформу, що дозволяє безпроблемну інтеграцію з іншими рішеннями.

Cisco ASA CX використовує можливості мережної архітектури безпеки Cisco SecureX Framework, що враховує контекст мереж корпоративних підрозділів і центрів обробки даних, а також у хмарних мережних сегментах. Особливості: це рішення дає адміністраторам можливість встановлювати пристрої і додатки з високим рівнем захисту і керованості. Адміністратори отримують чіткі дані про тип пристрою, встановленої на ньому операційній системі, місцезнаходження пристрою і поточний рівень безпеки.

Відключення неживаних портів – це простий спосіб захисту мережі від несанкціонованого доступу. Наприклад, якщо комутатор Catalyst 2960 має 24 порти і при цьому використовуються три підключення Fast Ethernet, рекомендується відключити 21 неживаний порт. Процес включення і відключення портів може зайняти багато часу, але він підвищує безпеку мережі.

Функція безпеки порту. Перед введенням комутатора в експлуатацію необхідно забезпечити безпеку усіх портів (інтерфейсів) комутатора. Один із способів захисту портів – використання функції безпеки портів (функція Port Security). Ця функція

обмежує кількість допустимих MAC-адрес на один порт, а також дозволяє доступ для MAC-адрес санкціонованих пристроїв і забороняє доступ для інших MAC-адрес.

Протокол Secure Shell (SSH) надає віддалений вхід в систему аналогічно Telnet, за винятком того, що він використовує безпечніші мережні служби. SSH – це протокол, який використовує клієнт-серверну модель для аутентифікації віддалених систем та забезпечення шифрування даних, обмін якими відбувається у рамках віддаленого доступу. Використання SSH підключення має низку переваг: безпечна робота на віддаленому ПК із використанням командної оболонки; використання різних алгоритмів шифрування (симетричного, асиметричного та хешування); можливість безпечного використання будь-якого мережного протоколу, що дозволяє передавати захищеним каналом файли будь-якого розміру.

ACL (Access Control List) – це набір текстових виразів, які щось дозволяють або щось забороняють. Зазвичай ACL дозволяє або забороняє IP-пакети, але також може заглядати всередину IP-пакета, переглядати тип пакета, TCP і UDP. ACL поділяються на два типи: Standard – можуть перевіряти лише адреси джерел; Extended – можуть перевіряти адреси джерел, а також адреси одержувачів, у разі IP ще тип протоколу та TCP/UDP порти.

CDP (Cisco Discovery Protocol) – протокол другого рівня, розроблений компанією Cisco Systems, що дозволяє виявляти підключене (безпосередньо або через пристрої першого рівня) мережне обладнання cisco, його назву, версію IOS та IP-адреси. Підтримується багатьма пристроями компанії, майже підтримується сторонніми виробниками.

Отримувана інформація включає типи підключених пристроїв, інтерфейси маршрутизатора, до яких сусідні пристрої підключені, інтерфейси, що використовуються для створення з'єднань, а також моделі пристроїв.

NAT – команда, забезпечує безпеку комп'ютерів, серверів та мережних пристроїв, блокуючи безпосередній доступ до Інтернету з реальної IP-адреси вузла. NAT дозволяє заблокувати доступ до приватної мережі ззовні. NAT ховає приватні IP-адреси від загальнодоступних мереж. Контроль доступу в деяких випадках бажаний, але може виявитися і недоліком у тому випадку, якщо потрібен віддалений доступ до пристрою в приватній мережі з Інтернету.

Динамічне перетворення NAT дозволяє вузлам з приватними IP-адресами з Інтернету підключатися до загальнодоступної мережі, наприклад, мережі Інтернет. Статичне перетворення мережних адрес (NAT) дозволяє вузлам із загальнодоступної мережі підключатися до окремих вузлів із приватної мережі. Це означає, що для налаштування NAT для зовнішнього доступу слід використовувати динамічний варіант NAT. Якщо пристрій із внутрішньої мережі має бути доступний ззовні, використовується статичний варіант NAT. Великий недолік NAT – додаткове навантаження, що створює перетворення IP-адреси та порту.

Протоколи формування захищеного каналу (PPTP, L2F і L2TP). Протокол PPTP забезпечує тунелювання і шифрування переданих даних. Протоколи L2F і L2TP підтримують тільки функції тунелювання. Для захисту даних у цих протоколах необхідно використовувати певний додатковий протокол, зокрема IPSec.

PAP та CHAP – протоколи автентифікації, що використовуються у протоколі PPP. PAP – Password Authentication Protocol. CHAP розшифровується як Challenge Handshake Authentication Protocol.

Принцип роботи PAP. Клієнт хоче підключитися до сервера, він відправляє серверу пароль, сервер відповідає або «Так», або «Ні». Запитуючи чи підходить пароль, відбувається передача самого паролю, з яким зловмисник надалі може робити все, що завгодно. Такі ситуації дозволяють уникнути протоколу CHAP.

Принцип роботи CHAP. Клієнт хоче звернутися до сервера, сервер передає клієнту випадковий рядок, клієнт бере пароль і рядок і обчислює від нього MD5 хеш, який повертає серверу. Сервер робить ті самі операції (якщо знає правильний пароль). Якщо хеші співпадають – клієнт авторизований. Якщо клієнт не знає пароль – хеші не збігатимуться, якщо замість сервера зловмисник – буде отримано лише хеш. Таким чином, у реальних мережах краще використовувати протокол CHAP.

Стек протоколів IPSec використовується для аутентифікації учасників обміну, тунелювання трафіку і шифрування IP-пакетів. Основне призначення протоколу IPSec (Internet Protocol Security) – забезпечення безпечної передачі даних по мережах IP. Оскільки архітектура IPSec сумісна з протоколом IPv4, її підтримку досить забезпечити на обох кінцях, з'єднання; проміжні мережні вузли можуть взагалі нічого «не знати» про IPSec. Протокол IPSec може захищати трафік як поточної версії протоколу IPv4, вживаної сьогодні в Інтернет, так і трафік нової версії IPv6, яка поступово впроваджується в Інтернет. Архітектура засобів безпеки IPSec Основне призначення протоколів IPSec – забезпечення безпечної передачі даних по мережах IP. Застосування IPSec гарантує:

- цілісність передаваних даних (тобто дані при передачі не спотворені, не втрачені і не продубльовані);
- автентичність відправника (тобто дані передані саме тим відправником, який довів, що він той, за кого себе видає);
- конфіденційність передаваних даних (тобто дані передаються у формі, що запобігає їх несанкціонованому перегляду).

VPN (англ. Virtual Private Network – віртуальна приватна мережа) – узагальнена назва технологій, що дозволяють забезпечити одне або кілька мережних з'єднань (логічну мережу) поверх іншої мережі (наприклад, Інтернет). Незважаючи на те, що комунікації здійснюються по мережах з меншим або невідомим рівнем довіри (наприклад, по публічних мережах), рівень довіри до побудованої логічної

мережі не залежить від рівня довіри до базових мереж завдяки використанню засобів криптографії (шифрування, аутентифікації, інфраструктури відкритих ключів, засобів для захисту від повторів і змін переданих по логічній мережі повідомлень).

Отже всі вищенаведені технології, протоколи та програми можуть бути запропоновані для включення до організаційно-технічної моделі кібербезпеки, що наведена на рис. 1, на рівні мережної інфраструктури

Висновок

У статті проаналізовано та досліджено принципи роботи і використання організаційно-технічної моделі кіберзахисту, ґрунтуючись на застосуванні засобів мережного захисту. Запропоновано ряд засобів, які будуть функціонувати на мережному рівні в моделі ОТМК. Розглянуто принципи роботи та алгоритм налаштування засобів захисту, що застосовуються на мережному рівні моделі ОТМК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бакалинський О. Модель та методи визначення проектних характеристик систем управління інформаційною безпекою: монографія. Київ : ТОВ «Три К», 2020. 162 с.
2. Семенченко А.І., Мьялковський Д.В. Розвиток інституційних спроможностей суб'єктів забезпечення системи кібербезпеки та кіберзахисту України. *Теорія та практика державного управління*. 2020. Вип. 3(70). С.40-54.
3. Demertzis K., Liadis L. Cognitive Web Application Firewall to Critical Infrastructures Protection from Phishing Attacks. *Journal of Computations & Modelling*. 2019. Vol. 9, no. 2. Pp. 1-26.
4. Потій О., Семенченко А., Дубов Д., Бакалинський О., Мьялковський Д. Концептуальні засади впровадження організаційно-технічної моделі кіберзахисту України. *Захист інформації*. 2021. Том 23, № 1. С. 48-53. DOI: <https://doi.org/10.18372/2410-7840.23.15434>
5. Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури, Постанова Кабінету Міністрів України № 1109 від 9 жовтня 2020 р. - режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>
6. Деякі питання об'єктів критичної інформаційної інфраструктури, Постанова Кабінету Міністрів України № 943 від 9 жовтня 2020 р. - режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/943-2020-%D0%BF#Text>
7. Klimushin, P., Solianyk, T., Kolisnyk, T., & Mozhaiv, 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>
8. Ruban, I., Bolohova, N., Martovytskyi, V., & Yaroshevych, R. (2021). Methodology for assessing the effectiveness of methods for embedding digital watermarks. *Advanced Information Systems*, 5(3), 112–118. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.15>
9. Mozhaiev M., Kuchuk N., Usatenko M. The method of jitter determining in the telecommunication network of a computer system on a special software platform. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 2019. Vol. 4 (10), pp. 134-140. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.134>
10. 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>
11. 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>
12. Ruban, I., Bolohova, N., Martovytskyi, V., & Koptsev, O. (2021). Digital image authentication model. *Advanced Information Systems*, 5(1), 113–117. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.16>
13. Cherneva, G., & Khalimov, P. (2021). Mutation testing of access control policies. *Advanced Information Systems*, 5(1), 118–122. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.17>
14. Гончар С.Ф. Оцінювання ризиків кібербезпеки інформаційних систем об'єктів критичної інфраструктури: монографія. Київ : Альфа реклама, 2019. 176 с.

Received (Надійшла) 19.05.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.08.2022

Provide a cyber defense officer at the level of infrastructure

Vladislav Hol, Adel Rakivska, Dmytro Rakivsky

Abstract. Domestic and foreign regulations related to the protection of web applications are analyzed. The article analyzes and proposes conceptual principles of implementation of organizational and technical model of cyber defense, purpose and goals. The architecture of organizational and technical model of cybersecurity is considered, which is a structured system consisting of three cybersecurity infrastructures, namely: organizational and managerial cybersecurity infrastructure, as a set of cybersecurity entities that form and implement state policy in cybersecurity; cyber security technological infrastructure, as a set of cyber security forces and means, as well as infrastructure that ensures the functioning of cyber security forces, information and communication networks and their resources used in the interests of cyber security forces and basic cyber security infrastructure, as a set of critical information infrastructure assets, communication and technological systems of enterprises, institutions and organizations that are classified as critical infrastructure. Therefore, the application and implementation of organizational and technical model of cyber defense is aimed at analyzing security incidents, assessing their consequences, counteracting and blocking means of protection and improving security systems, rapid response to cyber threats, cyber incidents, countermeasures and minimize vulnerabilities in communication systems. It is through the application of the level of protection of the information and telecommunications system that the confidentiality, integrity and accessibility of information and information systems is ensured.

Keywords: cyber threat, information security system, complex information protection system, complex of protection means, objects of critical infrastructure.

В. Д. Карлов¹, О. Л. Кузнецов¹, О. В. Коломійцев²,
І. В. Красношарпа¹, І. М. Петрушенко³, О. В. Струцінський⁴

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

² Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

³ Військова академія, Одеса, Україна

⁴ Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця, Україна

МОЖЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ТРОПОСФЕРИ ПРИ ВИМІРЮВАННІ КУТОВИХ КООРДИНАТ ТА ВИСОТИ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОБ’ЄКТА

Анотація. Пошук шляхів підвищення якості просторової обробки радіолокаційного сигналу в умовах впливу тропосферних неоднорідностей є актуальною задачею, що спрямована на підвищення ефективності використання радіолокаційної техніки за призначенням. У статті визначено два шляхи врахування впливу тропосфери при вимірюванні куткових координат та висоти аеродинамічного об’єкта (АО). Перший шлях передбачає оперативне визначення закону зміни градієнта коефіцієнта заломлення та обчислення відповідних поправок на рефракцію. Розглянуто найбільш зручні для використання моделі закону зміни індексу заломлення з висотою та проаналізовано особливості їх застосування. Другий шлях пов’язаний з врахуванням корельованих фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу в алгоритмі його просторової обробки. Наведено особливості даного врахування стосовно радіолокаторів з фазованою антенною решіткою (ФАР). Внаслідок статистичної незалежності неоднорідностей тропосфери, в силу центральної граничної теореми теорії ймовірностей, закон розподілу фазових флуктуацій вважається нормальним. Здійснено порівняльний аналіз даних шляхів врахування впливу тропосфери при вимірюванні куткових координат та висоти аеродинамічного об’єкта. Проведено порівняння флуктуаційних складових середньоквадратичних похибок (СКП) оптимального вимірювання кутової координати та висоти за умовою врахування фазових флуктуацій з відповідними СКП флуктуаційних складових похибок вимірювання кутової координати та висоти без врахування вказаних флуктуацій для випадків опису міжканальної кореляції фазових флуктуацій за експонентною, осцилюючою та Гаусовою залежностями. Отримані результати дозволяють оцінити доцільність застосування оптимального алгоритму вимірювання кута місця та висоти АО в радіолокаторах з ФАР для конкретних умов впливу тропосферних неоднорідностей.

Ключові слова: аеродинамічний об’єкт, висота, градієнт коефіцієнта заломлення, кут місця, метеорологічні параметри, радіолокаційний сигнал, середньоквадратична похибка, статистична оптимізація, точність вимірювання, тропосфера, фазована антенна решітка, фазові флуктуації.

Вступ

Отримання повної радіолокаційної інформації про просторове положення повітряних об’єктів є невід’ємною вимогою до сучасних радіолокаторів.

Зокрема, вимірювання куткових координат та визначення висоти з високою точністю є необхідною умовою подальшого стійкого автоматичного супроводження об’єктів радіолокаційного спостереження, особливо тих, що рухаються на малих та гранично малих висотах. При використанні за призначенням радіолокаторів приморського та морського базування можливим є захоплення електромагнітних хвиль тропосферними радіохвилеводами, що сприяє значному підвищенню дальності виявлення локаційних об’єктів. Однак, це супроводжується суттєвим зростанням впливу флуктуаційних явищ на якість обробки радіолокаційної інформації [1].

Вказаний вплив сприяє погіршенню якості просторово-часової обробки радіолокаційного сигналу, зокрема, зниженню точності вимірювання куткових координат аеродинамічних об’єктів (АО) [2].

З розробкою нових трикоординатних радіолокаційних станцій (РЛС), зокрема РЛС з фазованою антенною решіткою (ФАР), та модернізацією існуючого парку радіолокаційних висотомірів актуальним постало питання щодо врахування тропосферного впливу, тобто поточного стану тропосфери, при вимірюванні куткових координат та обчисленні висоти польоту АО.

В РЛС попереднього покоління, визначення поточного стану тропосфери забезпечувалося використанням відповідного набору метеоприладів, однак ефективність їх застосування при вимірюванні висоти АО була досить низькою.

В сучасних РЛС, вдосконалення елементної бази суттєво ускладнює існуючі алгоритми обробки радіолокаційних сигналів, що спрямовані на оптимізацію вимірювання координат та параметрів руху АО з врахуванням впливу зовнішніх факторів на процес радіолокаційного спостереження. Отже, врахування впливу тропосфери на якість просторових вимірювань можливо реалізувати такими шляхами.

Традиційним шляхом є розрахунок відповідних поправок, які залежать від поточних метеорологічних параметрів тропосфери [3, 4] та їх застосування при отриманні оцінок висоти АО.

Іншим шляхом є проведення статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки радіолокаційного сигналу за рахунок врахування флуктуаційних явищ при поширенні радіолокаційного сигналу крізь тропосферні неоднорідності з реалізацією відповідних оптимальних алгоритмів на сучасній елементній базі радіолокаторів нового покоління. Найбільш повно вказані можливості можуть бути реалізовані в цифрових радіолокаторах з ФАР.

Таким чином, вище викладене обумовлює необхідність проведення порівняльного аналізу можливостей реалізації даних шляхів з визначенням відповідних переваг та недоліків кожного з них.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Пошук шляхів підвищення якості просторової обробки радіолокаційного сигналу в умовах впливу тропосферних неоднорідностей передбачає оцінювання шумової та флуктуаційної складових похибки вимірювання кутових координат АО.

У [5] доведено, що фазові флуктуації, які виникають внаслідок впливу тропосферних неоднорідностей, розподілені за нормальним законом з нульовим середнім. Отримання дисперсії флуктуаційної складової похибки вимірювання кутової координати АО доцільно здійснювати згідно методики, аналогічної випадку часо-частотної обробки радіолокаційного сигналу, яка викладена у [6].

Послідовність оцінювання флуктуаційної складової середньоквадратичної похибки (СКП) вимірювання кутової координати стосовно РЛС з ФАР сантиметрового діапазону довжин хвиль при експонентній кореляційній функції фазових флуктуацій наведено у [7].

Окрім цього, для РЛС даного типу, можливе зниження точності вимірювання кутових координат об'єктів радіолокаційного спостереження внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні оцінено у [8].

З врахуванням даних результатів, у [9] надано чисельний аналіз флуктуаційних відхилень просторового положення АО у вертикальній та горизонтальній площинах від шляху хвилі у тропосфері.

Явище тропосферної рефракції сприяє реалізації можливості спостереження АО за межами дальності прямої видимості радіолокатора. Однак, це, у свою чергу, викликає суттєве зростання саме флуктуаційних складових похибок вимірювання координат та параметрів руху АО, що безпосередньо доведено у [2, 10]. У вказаних роботах бракує проведення чисельного аналізу СКП вимірювання кутових координат АО для інших видів кореляційних функцій фазових флуктуацій окрім експонентного. Тому, доцільно поширити отримані результати на випадки зміни кореляції фазових флуктуацій за осцилюючим та гаусовим законами зміни з подальшим застосуванням даних результатів при вимірюванні висоти АО. Вибір відповідного закону зміни кореляції фазових флуктуації має експериментальне підтвердження, яке надано у [11].

Можливості врахування поточного стану тропосферної рефракції при вимірюванні висоти польоту АО в радіолокаторах контролю повітряного простору проаналізовані у [12]. При цьому, вказується, що вплив тропосферної рефракції обумовлює виникнення додаткових рефракційних похибок вимірювання кута місця, і як слід висоти АО, які залежать від градієнта коефіцієнта заломлення у напрямку поширення радіолокаційного сигналу в атмосфері. Врахування рефракції здійснюється шляхом введення у алгоритм визначення висоти АО поправки на рефракцію, розрахунок якої надано для декількох найбільш поширених моделей зміни індексу заломлення з висотою.

Однак, можливості вказаних пропозицій є обмеженими за рахунок низької точності оцінок зако-

ну зміни градієнта коефіцієнта заломлення та економічної недоцільності розгортання мережі метеостанцій для уточнення даного закону.

З точки зору розвитку сучасної теорії статистичної оптимізації обробки радіолокаційного сигналу, значно більш перспективним є шлях врахування кореляції фазових флуктуацій, обумовлених впливом неоднорідностей тропосфери, безпосередньо у алгоритмах просторової обробки.

Пропозиції щодо статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу шляхом врахування корельованих фазових флуктуацій надані у [13].

Порядок розрахунку дисперсії флуктуаційної складової похибки вимірювання кутової координати АО за умовою врахування фазових флуктуацій сигналу надано у [14].

Таким чином, у наведених роботах не у повному обсязі надано порівняльного чисельного аналізу похибок вимірювання кутових координат АО з врахуванням та без врахування тропосферного впливу при просторовій обробці радіолокаційного сигналу для конкретних параметрів РЛС приморського та морського базування. Даний чисельний аналіз доцільно провести для різних законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій.

Метою статті є визначення можливостей врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти АО стосовно РЛС приморського та морського базування.

Основна частина

Як зазначено у [12], визначення висоти АО здійснюється за вимірними параметрами руху – похилої дальності та куту місця.

У багатьох сучасних трикоординатних РЛС кут місця АО найчастіше визначається амплітудним, частотним та фазовим методами.

Так, амплітудний метод реалізовано у рухомих радіовисотомірах [15, 16]. Частотний метод застосовано у когерентно-імпульсних радіолокаторах з дзеркальними антенами, що мають куточастотну чутливість [17, 18]. Фазовий метод використовується у радіолокаторах з ФАР [18].

Висота АО з врахуванням кривизни Землі та без врахування тропосферної рефракції визначається за формулою [12]:

$$h = r \sin \varepsilon + r^2 / (2R_3) + h_a, \quad (1)$$

де r – похила дальність АО; ε – кут місця АО; R_3 – радіус Землі; h_a – висота розташування антени радіолокатора над поверхнею, відносно якої здійснюється відлік висоти АО.

Вплив тропосферної рефракції обумовлює виникнення додаткових рефракційних похибок вимірювання кута місця, і як слід висоти АО, які залежать від градієнта коефіцієнта заломлення n у напрямку поширення радіохвилі в атмосфері [12]:

$$\text{grad}n = g_n = dn/dr = n'. \quad (2)$$

При цьому, рефракційна похибка вимірювання кутової координати АО визначається як

$$\Delta \varepsilon_{ref} = 0,5 \cdot r \cdot n'. \quad (3)$$

Величини n і n' залежать від висоти відносно земної поверхні та стану атмосфери (особливо у нижніх шарах постійно змінюється), а також у кожній точці на шляху поширення електромагнітних коливань мають власне значення [12]. Тобто, залежності $n(r)$ та $n'(r)$ носять складний характер.

Таким чином, траєкторія променя є кривою складної форми і градієнт коефіцієнта заломлення тропосфери у кожній точці даної траєкторії має власну, у значній мірі випадкову величину.

Можна визначити основні два шляхи подолання проблеми випадковості коефіцієнта заломлення у тропосфері.

Перший шлях – пов'язаний з оперативним визначенням закону зміни градієнта коефіцієнта заломлення n' для чого необхідно здійснювати спеціальне зондування атмосфери на шляху поширення радіохвилі. При цьому, врахування рефракції здійснюється введенням у (1) поправки на рефракцію Δh_{ref} [12]:

$$h = r \cdot \sin \varepsilon + \frac{r^2}{2R_3} + h_a + \Delta h_{ref}. \quad (4)$$

Величина даної поправки визначається похилою дальністю r , кутом місця ε та залежить від величини рефракційної похибки вимірювання кута місця АО $\Delta \varepsilon_p$ за виразом:

$$\Delta h_{ref} = r \cdot \Delta \varepsilon_{ref} \cdot \cos \varepsilon. \quad (5)$$

Рефракційна похибка $\Delta \varepsilon_{ref}$ визначається викривленням променя та залежить від градієнта коефіцієнта заломлення у напрямку поширення радіохвилі в атмосфері за (3).

Другий шлях – передбачає проведення статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки радіолокаційного сигналу для врахування в них корельованих флуктуацій його фази, які, у свою чергу, обумовлені флуктуаціями величин n і n' у тропосфері.

Нижче проведено порівняльний аналіз вказаних шляхів врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти АО.

Перший шлях – базується на припущеннях про те, що градієнт коефіцієнта заломлення змінюється тільки з висотою і для кожної точки над земною поверхнею в межах зони виявлення РЛС закон його зміни є однаковим [19]. Окрім цього, вважається, що реальні закони зміни $n(h)$ і $n'(h)$ можна апроксимувати детермінованими функціями та використовувати зручні моделі закону зміни даних величин.

Значення коефіцієнта заломлення n в атмосфері лише на десятитисячні долі перебільшує одиницю [12]. Тому, на практиці використовують індекс заломлення N і його градієнт N' , які визначаються як

$$N = (n - 1) \cdot 10^6; \quad N' = n' \cdot 10^6. \quad (6)$$

Далі, доцільно розглянути найбільш зручні для користування моделі закону зміни $N(h)$ та $N'(h)$.

Найпростішою моделлю зміни індексу заломлення з висотою є лінійна модель [12]:

$$N(h) = N_o + N'_o \cdot h, \quad (7)$$

де N_o і N'_o – індекс заломлення та його градієнт на поверхні Землі.

Модель (7) використовується переважно для нижніх шарів тропосфери, де, за умови її однорідності, градієнт індексу заломлення можна вважати постійним. Недоліком цієї моделі можна вважати те, що вона не враховує поточні зміни градієнта індексу заломлення в точці стояння радіолокатора та його висотні зміни. Вказане обумовлює появу похибок у вимірюванні кутових координат і висоти АО.

Більш поширеною моделлю закону зміни індексу заломлення є поліноміальна модель, згідно з якою градієнт змінюється за законом [12]:

$$N'(h) = N'_o \frac{50 - h}{50}. \quad (8)$$

За даною моделлю, на поверхні Землі градієнт індексу заломлення має значення N'_o , а на висотах більше 50 км він дорівнює 0.

Недоліком поліноміальної моделі закону зміни індексу заломлення є відсутність, при її використанні, врахування поточних значень градієнта індексу заломлення по траєкторії поширення радіохвилі. Спроби врахування даних поточних значень були вжиті у радіолокаційних висотомірах але тільки у точці їх стояння.

Обчислення поточного значення градієнта індексу заломлення N' у точці стояння РЛС здійснюється через врахування еквівалентної приведенної температури атмосфери T_{en} у точці стояння РЛС [12]:

$$N'_o(T_{en}) = N'_o(0,8 + k \cdot T_{en}), \quad (9)$$

де $N'_o = -4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ – градієнт індексу заломлення для "стандартної" атмосфери; $k = -0,67 \cdot 10^{-2} \text{ град}^{-1}$ – нормуючий коефіцієнт.

Еквівалентна приведена температура T_{en} визначається тиском, вологістю та температурою атмосфери. У приземних шарах атмосфери:

$$0^\circ \leq T_{en} \leq 60^\circ,$$

а для "стандартної" атмосфери: $T_{en} = -30^\circ$.

Як доведено у [12], введення поняття "еквівалентної приведенної температури" та врахування, таким чином, поточного стану атмосфери при вимірюванні висоти АО не відповідає реальному стану тропосфери та не є доцільним для розрахунку рефракційних поправок. При цьому, різка зміна градієнта індексу заломлення характерна переважно для радіолокаційного спостереження АО, що рухаються на малих та гранично малих висотах (1...1,5 км).

Згідно [12], промінь реально піддається найбільшому викривленню лише на 10 % траєкторії, а

віднесення цього викривлення до всієї траєкторії призводить тільки до зростання похибок вимірювання висоти АО у порівнянні з випадком орієнтування на "стандартну" атмосферу.

У випадку неможливості практичного отримання висотного профілю градієнта індексу заломлення, доцільно користуватися статистичними характеристиками висотного профілю градієнта індексу заломлення, як функціями висоти.

Таким чином, до висоти 50 км користування поточними значеннями градієнта індексу заломлення у точці стояння РЛС з лінійним характером його зміни є недоцільним. Кращі результати дають користування поліноміальною моделлю або усередненим законом зміни градієнта індексу заломлення по висоті для різних пір року та різних часів доби за даними метеоспостережень у районі розгортання РЛС. Тобто, точність поправки на рефракцію при обчисленні висоти АО залежить від якості визначення закону зміни градієнта індексу заломлення на шляху поширення електромагнітних хвиль. Умовою забезпечення вказаного визначення є наявність густої мережі метеостанцій для здійснення зондування стану атмосфери, реалізація якої є проблематичною. Тому, у більшості радіолокаторів при визначенні висоти АО можливе використання або лінійної або поліноміальної моделей зміни індексу заломлення з висотою за умови стандартної атмосфери у точці стояння РЛС.

Другий шлях – базується на припущенні про нормальний закон розподілу фазових флуктуацій прийнятого радіолокатором радіосигналу, який пройшов неоднорідну тропосферу [5]. Тобто, точність вимірювання кутових координат і, як слід, розрахунку висоти АО залежить від якості визначення закону зміни кореляції фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу. Вказане обумовлює необхідність визначення можливостей підвищення точності вимірювання кутових координат та висоти АО за рахунок статистичної оптимізації алгоритму просторової обробки шляхом врахування кореляційних властивостей прийнятого радіосигналу.

У [5, 9, 18] показано, що найбільш перспективними, з точки зору ефективності виконання завдань за призначенням, є радіолокатори з антенами типу ФАР. При цьому, як доведено у [9], флуктуаційні горизонтальне та вертикальне просторове відхилення у радіолокаторах з ФАР, завдяки впливу тропосферної рефракції, можуть зростати до сотень метрів.

Тому, нижче наведені результати оцінювання можливостей статистичної оптимізації кутових координат і висоти АО – є логічним продовженням досліджень, які проведені у [9].

В багатьох сучасних радіолокаторах з ФАР визначення кутових координат АО здійснюється фазовим методом [5, 18], згідно з яким кут місця визначається за виразом:

$$\varepsilon = \arcsin \frac{\varphi_k \lambda}{2\pi(k-1)d}, \quad (10)$$

де φ_k – фазовий зсув між k -м і першим елементом ФАР; λ – довжина хвилі радіолокатора; d – крок

антенної решітки. Шлях статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу з врахуванням корельованих фазових флуктуацій передбачає оцінювання кута приходу хвилі за алгоритмом [13]:

$$\varepsilon = \arcsin \frac{\lambda}{2\pi d} \sum_{k=1}^m g_k \Delta\Phi_k, \quad (11)$$

де $\Delta\Phi_k = \Phi_{m+1-k} - \Phi_{m+k}$ – значення різниці фаз сигналів k -ї симетричної пари каналів антенної решітки (номер пари відраховується від 1 у центрі ФАР до m на її краях); m – число пар симетричних каналів ФАР; g_k – вагові коефіцієнти, які враховують сумісний вплив фазових флуктуацій і адитивних шумових коливань.

Вагові коефіцієнти g_k залежать від відстані між симетричними елементами ФАР, амплітудного розподілу та статистичних характеристик фазових флуктуацій – дисперсії (σ_φ^2) та коефіцієнта кореляції у сусідніх елементах ФАР (a).

При переважному впливі фазових флуктуацій над впливом внутрішніх шумів приймача, порядок обчислення даних вагових коефіцієнтів наведено у [20]. Оскільки неоднорідності тропосфери можна вважати статистично незалежними, то, за центральною граничною теоремою, флуктуації фази мають нормальний закон розподілу [5].

Оптимальне вимірювання кутової координати АО (11), дозволяє підвищити точність оцінювання висоти, згідно (1). Представляє практичну користь порівняння флуктуаційної складової СКП оптимального вимірювання кутової координати за умовою врахування фазових флуктуацій сигналу $\sigma_{\varepsilon_{onm}}^2$ [14] при оцінюванні кутової координати АО за (11), з СКП флуктуаційної складової похибки вимірювання кутової координати АО без врахування вказаних флуктуацій $\sigma_{\varepsilon_{fl}}^2$ [7] при оцінюванні кутової координати АО за (10). Даний чисельний аналіз доцільно провести для різних законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій. Дисперсія $\sigma_{\varepsilon_{onm}}^2$ при $m \geq 2$ визначається за виразом [14]:

$$\sigma_{\varepsilon_{onm}}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\pi d \cos \varepsilon} \right)^2 \frac{\sigma_\varphi^2 (1+a)}{1-a} \times \left\{ \sum_{k=1}^{m-1} (2k-1)^2 + \frac{(2m-1)[2m-1-(2m-3)a]}{(1-a)^2} \right\}^{-1}. \quad (12)$$

Першим варіантом розгляду опису коефіцієнта міжканальної кореляції фазових флуктуацій – є експонентна залежність:

$$a = e^{-d/\rho}, \quad (13)$$

де ρ – просторовий радіус кореляції фазових флуктуацій.

Для випадку (13), дисперсія $\sigma_{\varepsilon_{fl.E}}^2$ визначається за виразом [7]:

$$\sigma_{\theta_{\text{фл.Е}}}^2 = 9\sigma_{\varphi}^2 \lambda^2 / \left(2\pi^2 d^2 m^2 (4m^2 - 1)^2 \right) \times \left(\sum_{j=1}^m \left((2j-1)^2 (1 - \exp(-d(2j-1)/\rho)) \right) \right) 2 \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-dl/\rho) + \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1)(2j+2l-1) (1 - \exp(-d(2j-1)/\rho)) \right) \quad (14)$$

Як доведено у [5], для радіолокаторів з ФАР, найбільший вплив тропосферних неоднорідностей спостерігається для сантиметрових і більш коротких хвиль.

Користуючись методикою розрахунку статистичних характеристик фазових флуктуацій, викладеної у [5] та застосованої у [7], розрахунок дисперсії та радіусу кореляції фазових флуктуацій доцільно провести для наступних вхідних даних:

$$m=25; \lambda = 0,1 \text{ м}; d = \lambda/2; h_a = 10 \text{ м}.$$

Вказані статистичні характеристики фазових флуктуацій при зовнішньому масштабі турбулентності тропосфери 1 км та різному шляху хвилі у тропосфері (z) приймають наступні значення:

- 1) z=50 км, $\sigma_{\varphi}^2=4,3 \text{ рад}^2$, $\rho = 226,9 \text{ м}$;
- 2) z=100 км, $\sigma_{\varphi}^2=8,5 \text{ рад}^2$, $\rho = 149,7 \text{ м}$;
- 3) z=150 км, $\sigma_{\varphi}^2 = 12,8 \text{ рад}^2$, $\rho = 117,4 \text{ м}$;
4. z=200 км, $\sigma_{\varphi}^2 = 17 \text{ рад}^2$, $\rho = 98,8 \text{ м}$.

Отримані значення статистичних характеристик узгоджуються з результатами оцінювання, які наведені у [21].

У табл. 1 надано значення СКП вимірювання кутової координати АО з врахуванням корельованих фазових флуктуацій $\sigma_{\varepsilon_{\text{онт.Е}}}$, які розраховано згідно (12) для наведених вище даних, експонентного закону зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій (13), за умов орієнтації діаграми спрямованості антени по нормалі до її апертури.

У табл. 1 також наведено відповідні значення флуктуаційної складової СКП вимірювання кутової координати АО без врахування корельованих фазових флуктуацій $\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.Е}}}$, які розраховано за (14).

$$\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.О}}}^2 = \frac{9\sigma_{\varphi}^2 \lambda^2}{2\pi^2 d^2 m^2 (4m^2 - 1)^2} \cdot \left(\sum_{j=1}^m (2j-1)^2 (1 - \exp(-d \cdot (2j-1)/\rho_{\varphi})) \cdot \cos((2j-1)\gamma d) + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-d \cdot l/\rho_{\varphi}) \cdot \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1) \cdot (2j+2l-1) \cdot (\cos(j\gamma d) - \exp(-d \cdot (2j-1)/\rho_{\varphi})) \cdot \cos((2j+l-1) \cdot \gamma d) \right) \quad (16)$$

Відповідні значення СКП вимірювання кутової координати та висоти АО з врахуванням фазових флуктуацій та без такого врахування для випадку коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій (15) наведено у табл. 2.

Третім варіантом опису коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій розглядаємо наступну Гаусову залежність:

$$a = e^{-(d/\rho)^2} \quad (17)$$

Для випадку (17), дисперсія $\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.Г}}}^2$ відповідно до [6] визначається за таким виразом:

Таблиця 1 – Значення СКП вимірювання кутової координати АО з врахуванням корельованих фазових флуктуацій

z, км	50	100	150	200
$\sigma_{\varepsilon_{\text{онт.Е}}}$, рад.	0,113°	0,196°	0,271°	0,34°
$\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.Е}}}$, рад.	0,123°	0,212°	0,294°	0,369°
$\sigma_{\text{нонт.Е}}$, м	255	939	2042	3549
$\sigma_{\text{нфл.Е}}$, м.	264	968	2103	3650

Представляє практичну користь поширити результати наведеної статистичної оптимізації на вимірювання висоти АО за (1).

Тому, відповідні значення флуктуаційних СКП вимірювання висоти АО, як з врахуванням $\sigma_{\text{нонт.Е}}$, так і без врахуванням фазових флуктуацій $\sigma_{\text{нфл.Е}}$ також надано у табл. 1.

Другим варіантом опису зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій – є осцилююча залежність, що експериментально підтверджено стосовно РЛС 35Д6 приморського базування [11], яка має наступний вигляд:

$$K_{\varphi}(d) = e^{-d/\rho} \cos(\gamma d), \quad (15)$$

де $\gamma = 2\pi/T_{\text{фл}}$ – частота осциляцій коефіцієнта кореляції фази; $T_{\text{фл}}$ – період осциляцій коефіцієнта кореляції фази.

Для випадку (15), відповідна дисперсія $\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.О}}}^2$ може бути отримана з [6], де вказане завдання вирішувалося стосовно оптимізації частотної обробки радіолокаційного сигналу, та, у свою чергу, має такий вигляд:

Таблиця 2 – Значення СКП вимірювання кутової координати та висоти АО з врахуванням фазових флуктуацій

z, км.	50	100	150	200
$\sigma_{\varepsilon_{\text{онт.О}}}$, рад.	0,113°	0,196°	0,271°	0,34°
$\sigma_{\varepsilon_{\text{фл.О}}}$, рад.	0,125°	0,219°	0,305°	0,385°
$\sigma_{\text{нонт.О}}$, м	255	939	2043	3550
$\sigma_{\text{нфл.О}}$, м.	266	979	2132	3707

$$\sigma_{\theta_{\text{фл.Е}}}^2 = \frac{9\sigma_{\varphi}^2 \lambda^2}{2\pi^2 d^2 m^2 (4m^2 - 1)^2} \cdot \left(\sum_{j=1}^m (2j-1)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\rho} (2j-1)^2\right) \right) + \right. \\ \left. + 2 \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-d \cdot l / \rho)^2 \cdot \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1) \cdot (2j+2l-1) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{\rho} (2j-1) \cdot (2j+2l-1)\right) \right) \right) \quad (18)$$

Відповідні до випадку (18) значення СКП вимірювання кутової координати та висоти АО наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Значення СКП вимірювання кутової координати та висоти АО з врахуванням Гаусової залежності

z, км.	50	100	150	200
$\sigma_{\text{еонт.О}}$, рад.	0,0017°	0,0036°	0,0056°	0,0077°
$\sigma_{\text{эфл.О}}$, рад.	0,012°	0,025°	0,039°	0,054°
$\sigma_{\text{хонт.О}}$, м	158	604	1348	2390
$\sigma_{\text{хфл.О}}$, м.	167	642	1436	2551

З отриманих результатів можливо заключити, що для вказаних умов, підвищення точності вимірювання кута місця та висоти АО за рахунок статистичної оптимізації просторової обробки радіолокаційного сигналу за наявності корельованих фазових флуктуацій, обумовлених впливом неоднорідностей тропосфери, складає 3 % для експонентного, 4 % для осцилюючого та 6 % для Гаусового законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій. При зменшенні довжини хвилі радіолокатору дане підвищення може бути більш суттєвим. Так, при оцінюванні, згідно наведеної методики, для $\lambda = 0,05$ м воно може складати відповідно – від 3 до 27 % для наведених вище законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій.

Висновки

1. Можна визначити два основних шляхи врахування впливу тропосфери на якість просторових вимірювань. Перший – полягає у розрахунку поправок

на рефракцію на основі даних про метеорологічні параметри тропосфери. Другий – базується на проведенні статистичної оптимізації алгоритмів просторової обробки за рахунок врахування флуктуаційних явищ при поширенні радіолокаційного сигналу крізь тропосферні неоднорідності.

2. Величина поправки на рефракцію визначається похилою дальністю, кутом місця та залежить від градієнта коефіцієнта заломлення у напрямку поширення радіохвилі в тропосфері. Точність поправки на рефракцію при обчисленні висоти АО залежить від якості визначення закону зміни градієнта індексу заломлення на шляху поширення електромагнітних хвиль. Тому умовою визначення вказаної поправки є застосування густої мережі метеостанцій для оперативного зондування стану атмосфери.

3. Статистична оптимізація алгоритмів просторової обробки радіолокаційного сигналу вимагає визначення закону зміни кореляції фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу. У радіолокаторах з ФАР оптимальне визначення кутових координат АО може бути реалізоване шляхом вагового сумування різниць фаз сигналів, прийнятих симетричними парами каналів антенної решітки. При цьому, відповідні вагові коефіцієнти визначаються дисперсією та коефіцієнтом кореляції фазових флуктуацій у сусідніх елементах ФАР.

4. Підвищення точності вимірювання кута місця та висоти АО за рахунок проведення статистичної оптимізації просторової обробки радіолокаційного сигналу може складати від одиниць до десятків відсотків у залежності від виду закону зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій у сантиметровому діапазоні довжин хвиль і є тим більшим, чим меншою є довжина хвилі радіолокатору.

Список літератури

1. Флюктуационные процессы при распространении радиоволн / М.П. Долуханов – М: Связь, 1971. – 183 с.
2. Карлов В. Д., Петрушенко Н. Н., Челпанов В. В., Квиткин К. П. Влияние среды распространения радиоволн на приморском направлении при измерении угловых координат радиолокационных целей. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2010. № 3(25). С. 51-53.
3. Использование радиочастотного спектра в метеорологии: прогнозирование и мониторинг погоды, климата и качества воды. Справочник. WMO, 2008. 120 с.
4. Климченко В. Й., Камалтинов Г. Г., Місайлов В. Л. Аналіз потенційних можливостей оглядових РЛС сантиметрового діапазону хвиль щодо забезпечення дій авіації Повітряних Сил України метеорологічною інформацією. *Системи озброєння і військова техніка*. 2011. № 1(25). С. 21–27.
5. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория / Под. ред. Я. Д. Ширмана. М.: ЗМАКВИС, 1998. 828 с.
6. Минервин Н. Н., Кузнецов А. Л., Минервин Н. Н. Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения цели, обусловленные неучетом флуктуаций фаз импульсов пачки. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2001. № 22. С. 288-294.
7. Kuznietsov O., Kovalchuk V., Kovalchuk A., Karlov D., Yarovyuy S., Vasylyshyn V. (2020). Providing the Required Accuracy of Measurements of Spatial Coordinates of Aerial Objects. *2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine, September 21-25 – Proceedings*, 2020, p. 226-229.
8. Кузнецов О. Л., Танцюра О. Б., Мельник О. Л. Обмеження якості просторових вимірювань в РЛС з фазованою антенною решіткою внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2012. № 1(21). Том 2. С. 49-52.

9. Карлов В. Д., Кузнецов О. Л., Белоусов В. В., Тузіков С. А., Олещук М. М., Петрушенко В. М. Точність вимірювання кутових координат аеродинамічних об'єктів в умовах тропосферної рефракції. *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. нах. пр. Полтавського національного технічного університету*. 2021. № 1(63). С. 146-152.
10. Карлов В. Д., Кучер Д. Б., Струцинський О. В., Лукашук О. В. До питання про вимірювання дальності маловисотної цілі при її радіолокації в межах тропосферного хвилеводу над морем. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 3(24). С. 98-101.
11. Карлов В. Д., Родюков А. О., Пічугін І. М. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. *Наука і техніка ПС Збройних Сил України*. 2015. № 4(21). С. 71-74.
12. Климченко В. Й., Камалтинов Г. Г., Місайлов В. Л., Рибалка Г. В. Вимірювання висоти польоту цілей в радіолокаторах контролю повітряного простору з урахуванням поточного стану тропосферної рефракції. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2019. № 3(61). С. 86-95.
13. Минервин Н. Н. Васюта К. С. Оптимальное оценивание угла прихода волны при наличии случайных искажений ее фронта и аддитивных помех. *Радиотехника*. 1998. № 105. С. 61-68.
14. Минервин Н. Н. Васюта К. С. Мера угловой разрешающей способности и точность измерения угла прихода волны при наличии случайных искажений ее фронта и аддитивного шума. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. № 12(4). С. 484-486.
15. Озброєння радіотехнічних підрозділів і частин ППО. Пересувний радіовисотомір ПРВ-13МЗР. Навчальний посібник / С. П. Володько, В. Д. Говоров, В. І. Зверев та ін. Х.:ХВУ, 2002. 142 с.
16. Подвижный радиовысотомер ПРВ-16. Учебное пособие / Г. В.Индус, А. А. Ваганов, В. П.Козлов и др. М.: Воениздат, 1979. 224 с.
17. Радиолокационная станция 36Д6М. Эксплуатация и техническое обслуживание РЛС 36Д6М. Учебное пособие / И. Я. Май, А. Г. Каспирович, В. А. Винник и др. Запорожье, КЭМЗ "Искра", 2006. 140 с.
18. Сєдшишев Ю. М., Карпенко В. І., Атаманський Д. В. та ін. Радіоелектронні системи. Х.: ХУПС, 2010. 418 с.
19. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. Изд. 2-е, дополненное и переработанное. М.: Соврадио, 1972. 464 с.
20. Минервин Н. Н. Васюта К. С. Особенности компенсации помеховой волны при флуктуациях ее фазового фронта. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. № 12(4). С. 493-495.
21. Вопросы статистической теории антенн / Я. С. Шифрин. М.: Сов. радио, 1970. 383 с.
22. Минервин Н. Н., Кузнецов А. Л. Оптимальные алгоритмы измерения радиальной скорости цели и угла прихода принимаемого радиосигнала с учетом фазовых флуктуаций, описываемых произвольной корреляционной функцией. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. № 12(4). С. 514-517.
23. Yevseiev S., Kuznietsov O., Herasimov S. et al. Development of an optimization method for measuring the doppler frequency of a packet taking into account the fluctuations of the initial phases of its radio pulses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 2/9 (110). P. 6-15.
24. Кузнецов О. Л., Коломійцев О. В., Кітов В. С., Карлов А. Д. Оцінювання точності поточного вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту в когерентно-імпульсній РЛС супроводження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 3(40). С. 91-99. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.40.10>.
25. Кузнецов, О., Коломійцев, О., Яровий, С., Олійник, Р., & Живець, Ю. (2021). Підвищення точності вимірювання кутових координат повітряних об'єктів при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу. *Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, (9), 65-72. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.9.2021.09>.

Received (Надійшла) 13.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.08.2022

Possibilities of accounting for the influence of the troposphere when measuring the angular coordinates and height of aerodynamic object

Volodymyr Karlov, Oleksandr Kuznietsov, Oleksii Kolomiitsev, Igor Krasnoshapka, Ivan Petrusenko, Oleh Strutsynskiy

Abstract. Finding ways to improve the quality of spatial processing of a radar signal under the influence of tropospheric inhomogeneities is an urgent task, which is aimed at improving the efficiency of using radar technology for its intended purpose. The article defines two ways to take into account the influence of the troposphere when measuring the angular coordinates and height of an aerodynamic object. The first way provides for the operational determination of the law of change in the gradient of the refractive index and the calculation of the corresponding corrections for refraction. The most convenient models for the law of refractive index change with height are considered and the features of their application are analyzed. The second way is connected with taking into account the correlated phase fluctuations of the radar signal in the algorithm of its spatial processing. The features of this accounting in relation to radars with a phased antenna array (PAR) are given. Due to the statistical independence of the inhomogeneities of the troposphere, by virtue of the central limit theorem of probability theory, the law of distribution of phase fluctuations is considered normal. A comparative analysis of these ways of taking into account the influence of the troposphere when measuring the angular coordinates and height of an aerodynamic object is carried out. The fluctuation components of the root-mean-square errors (RMS) of the optimal measurement of the angular coordinate and height are compared, provided that phase fluctuations are taken into account with the corresponding RMS of the fluctuation components of the errors in the measurement of the angular coordinate and height, without taking into account these fluctuations, for the cases of describing the interchannel correlation of phase fluctuations of exponential, oscillating, and Gaussian dependencies. From a practical point of view, the results obtained make it possible to evaluate the feasibility of using the optimal algorithm for measuring the elevation angle and height of an aerodynamic object in radars with phased array for specific conditions of the influence of tropospheric inhomogeneities.

Keywords: aerodynamic object, height, refractive index gradient, meteorological parameters, radar signal, root-mean-square error, statistical optimization, measurement accuracy, troposphere, elevation angle, phased antenna array, phase fluctuations.

Є. В. Пелешок, С. І. Вовк, Х. І. Соловей

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ПІДОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ РОЗДІЛЕННЯ-ДЕМОДУЛЯЦІЇ ДВОХ ВЗАЄМНО НЕОРТОГОНАЛЬНИХ СИГНАЛІВ QPSK

Анотація. Метою роботи є підвищення завадозахищеності прийому (демодуляції) корисного ЦС з QPSK в умовах впливу потужної подібної завади. **Постановка задачі.** Розробити правило прийняття рішення про переданий ДП корисного ЦС з QPSK в умовах впливу потужної QPSK-завади. **Результати.** В статті представлено синтез підоптимального алгоритму демодуляції двох синхронних взаємно неортогональних цифрових сигналів з QPSK-модуляцією. За відсутності завади даний алгоритм вироджується в класичну когерентну демодуляцію цифрового сигналу з QPSK. При суттєвому перевищенні миттєвої потужності завади над миттєвою потужністю корисного цифрового сигналу з QPSK завадозахищеність прийому останнього наближається до завадозахищеності прийому в каналі з адитивним білим гаусівським шумом без завади. **Висновок.** Даний алгоритм демодуляції може використовуватися при розробці модемних компенсаторів, що забезпечують повторне використання частотного ресурсу, а також при розробці перспективних завадозахищених засобів радіозв'язку.

Ключові слова: QPSK-модуляція, BPSK-модуляція, цифровий сигнал, демодуляція, взаємно неортогональний сигнал.

Вступ

Актуальність теми. При розробці сучасних радіозасобів нагальною залишається проблема надійного прийому цифрового сигналу (ЦС) в умовах обмеженості радіочастотного ресурсу, завмирань, багатопроменевості, доплерівських зсувів частоти, впливу різноманітних структурних завад. Тому актуальним в межах зазначеної проблеми є пошук шляхів ефективного використання радіочастотного ресурсу та демодуляції корисних ЦС в умовах впливу навмисних або ненавмисних завад включаючи подібні за структурою до корисного сигналу.

Слід також зазначити, що забезпечити захист цифрових ліній військового або цивільного радіозв'язку від великого різноманіття потужних завад з використанням будь-якого одного методу очевидно, неможливо. У зв'язку з цим виникає необхідність серед множини технічних методів боротьби з завадами вибирати деяку раціональну їх сукупність, що забезпечуватиме виконання сучасних вимог до завадозахищеності цифрових ліній радіозв'язку спеціального призначення.

Новизна теми. Синтезований підоптимальний алгоритм демодуляції двох взаємно неортогональних ЦС з QPSK є певним подальшим розвитком статистичної теорії демодуляції дискретних сигналів.

Відмінною особливістю даного алгоритму від загальновідомої класичної когерентної демодуляції сигналу з QPSK, що визначає його наукову новизну є наявність у вхідному спостереженні, крім корисного сигналу з QPSK та адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ), подібної за своєю структурою до корисного сигналу завади.

Практична цінність теми. Значення вирішеної задачі для практики полягає в доведенні принципової можливості розробки, на основі синтезованого правила прийняття рішення про переданий дискретний параметр, функціональної схеми когерентного демодулятора корисного ЦС з QPSK в

умовах впливу QPSK-завади.

Метою роботи є підвищення завадозахищеності прийому (демодуляції) корисного ЦС з QPSK в умовах впливу потужної подібної завади.

Постановка задачі. Маємо канал радіозв'язку з постійними (повільно змінними) параметрами в порівнянні з тривалістю тактового інтервалу та АБГШ;

- вхідне спостереження – корисний ЦС з QPSK в умовах адитивного впливу потужної подібної завади;

- критерій оптимальності – мінімум середньої ймовірності помилки на біт при визначенні стану дискретного параметра (ДП) корисного ЦС.

Треба розробити правило прийняття рішення про переданий ДП корисного ЦС з QPSK в умовах впливу потужної QPSK-завади.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що найгіршою завадостійкістю розділення-демодуляції взаємно неортогональних цифрових сигналів з переривчастим випромінюванням виявляється тоді, коли їх миттєві потужності відрізняються несуттєво (орієнтовано в межах 3 дБ для сигналів BPSK, QPSK). Складність оптимальних алгоритмів багатокористувацького детектування, що синтезуються методами статистичної теорії розділення цифрових сигналів експоненціально зростає в залежності від кількості сигналів, що підлягають розділенню [1,4].

Розглянемо модель спостереження у вигляді двох взаємно неортогональних QPSK-сигналів:

$$y_t = (-1)^{r_1} A_1 \cos \omega t + (-1)^{r_2} A_1 \sin \omega t + (-1)^{r_3} \times \\ \times A_2 \cos(\omega t + \varphi) + (-1)^{r_4} A_2 \sin(\omega t + \varphi) + n(t), \quad (1)$$

де $r_{1...4} \in \{0,1\}$ – інформаційні дискретні параметри (ДП) малопотужного ($r_{1,2}$) і потужного ($r_{3,4}$) QPSK-сигналу; $n(t)$ – адитивний білий гаусівський шум; $k = 1, 2, 3, \dots$ – номер інформаційного тактового ін-

тервалу; A_1 – амплітуда 1-го QPSK-сигналу; A_2 – амплітуда 2-го QPSK-сигналу.

Для прозорості пояснень будемо вважати, що сигнали синхронні за тактовими точками та інформаційні тактові інтервали T – співпадають.

В [1] наведено загальне правило прийняття рішення (ППР) задачі розділення 4-х сигналів двійкової ФМ, синхронних за тактовими точками оптимальних за критерієм мінімуму імовірності помилки ДП. Виходячи з моделі спостереження, розроблене ППР представлено таким чином:

$$\begin{aligned} \eta_1^* = & \text{rect} \left\{ - \left\{ \text{sh} \left[b_1 - 2(-R_{12} - R_{13} - R_{14}) \right] \times \right. \right. \\ & \times \exp \left[-b_2 - b_3 - b_4 - 2(R_{23} + R_{24} + R_{34}) \right] + \\ & + \text{sh} \left[b_1 - 2(-R_{12} - R_{13} + R_{14}) \right] \times \\ & \times \exp \left[-b_2 - b_3 + b_4 - 2(-R_{23} - R_{24} - R_{34}) \right] + \\ & + \text{sh} \left[b_1 - 2(-R_{12} + R_{13} - R_{14}) \right] \times \\ & \times \exp \left[-b_2 + b_3 - b_4 - 2(-R_{23} + R_{24} - R_{34}) \right] + \\ & + \text{sh} \left[b_1 - 2(-R_{12} + R_{13} + R_{14}) \right] \times \\ & \times \exp \left[-b_2 + b_3 + b_4 - 2(-R_{23} - R_{24} + R_{34}) \right] + \\ & + \text{sh} \left[b_1 - 2(R_{12} - R_{13} - R_{14}) \right] \times \\ & \times \exp \left[b_2 - b_3 - b_4 - 2(-R_{23} - R_{24} + R_{34}) \right] + \\ & + \text{sh} \left[b_1 - 2(R_{12} - R_{13} + R_{14}) \right] \times \\ & \times \exp \left[b_2 - b_3 + b_4 - 2(-R_{23} + R_{24} - R_{34}) \right] + \\ & + \text{sh} \left[b_1 - 2(R_{12} + R_{13} - R_{14}) \right] \times \\ & \times \exp \left[b_2 + b_3 - b_4 - 2(R_{23} - R_{24} - R_{34}) \right] + \\ & \left. \left. + \text{sh} \left[b_1 - 2(R_{12} + R_{13} + R_{14}) \right] \times \right. \right\} \\ & \times \exp \left[b_2 + b_3 + b_4 - 2(R_{23} + R_{24} + R_{34}) \right] \left. \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\text{rect}(x \geq 0) = 1$; $\text{rect}(x < 0) = 0$.

Згідно моделі спостереження (1):

$$b_1 = \frac{2A_1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \cos \omega t dt; \quad b_2 = \frac{2A_1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \sin \omega t dt;$$

$$b_3 = \frac{2A_2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \cos(\omega t + \varphi) dt;$$

$$b_4 = \frac{2A_2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \sin(\omega t + \varphi) dt; \quad R_{12} = R_{34} = 0;$$

$$R_{13} = \frac{A_1 A_2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos \omega t \cos(\omega t + \varphi) dt;$$

$$R_{14} = \frac{A_1 A_2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos \omega t \sin(\omega t + \varphi) dt;$$

$$R_{23} = \frac{A_1 A_2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \sin \omega t \cos(\omega t + \varphi) dt.$$

Перетворимо аргумент ППР (2) в суму добутоків функцій $\text{sh}(\cdot)$, $\text{ch}(\cdot)$ та поділимо на невід'ємний добуток вигляду:

$$K = \text{ch}(b_1) \text{ch}(b_2) \text{ch}(b_3) \text{ch}(b_4) \text{ch}(2R_{12}) \times \\ \times \text{ch}(R_{13}) \text{ch}(2R_{14}) \text{ch}(R_{23}) \text{ch}(2R_{24}) \text{ch}(R_{34}).$$

В результаті, для першого ДП отримуємо ППР в виді:

$$\eta_1^* = \text{rect} \left\{ - \left[K_0 \text{th} b_1 + K_{12} \text{th} b_2 + K_{13} \text{th} b_3 + \right. \right. \\ \left. \left. + K_{14} \text{th} b_4 + K_R \text{th} b_2 \text{th} b_3 \text{th} b_4 + K_{34} \text{th} b_1 \text{th} b_3 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \text{th} b_4 + K_{24} \text{th} b_1 \text{th} b_2 \text{th} b_4 + K_{23} \text{th} b_1 \text{th} b_2 \text{th} b_3 \right] \right\}. \quad (3)$$

В (3) коефіцієнти при функціях $\text{th}(\cdot)$ мають вид [1]:

$$K_0 = 1 + \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24}) > 0;$$

$$K_{12} = \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{23}) + \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{24});$$

$$K_{13} = -\text{th}(2R_{13}) - \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24});$$

$$K_{14} = -\text{th}(2R_{14}) - \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24});$$

$$K_{23} = -\text{th}(2R_{23}) - \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{24});$$

$$K_{24} = -\text{th}(2R_{24}) - \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{23});$$

$$K_{34} = \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{14}) + \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24});$$

$$K_R = \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{24}) + \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{23}).$$

Введемо припущення, що спростують. Наприклад, якщо другий сигнал суттєво потужніший другого, то опосередкований вплив першого самого на себе через другий спростуємо (спростуємо в ППР всі компоненти, містять $\text{th} b_2$. Тоді:

$$\begin{aligned} \eta_1^* = & \text{rect} \left\{ - \left[\begin{array}{l} K_0 \text{th} b_1 + K_{13} \text{th} b_3 + K_{14} \text{th} b_4 + \\ + K_{34} \text{th} b_1 \text{th} b_3 \text{th} b_4 \end{array} \right] \right\} = \\ = & \text{rect} \left\{ - \left[\begin{array}{l} \text{th} b_1 + \frac{K_{34}}{K_0} \text{th} b_1 \text{th} b_3 \text{th} b_4 + \\ + \frac{K_{13}}{K_0} \text{th} b_3 + \frac{K_{14}}{K_0} \text{th} b_4 \end{array} \right] \right\} = \\ = & \text{rect} \left\{ - \left[\begin{array}{l} \text{th} b_1 \left(1 + \frac{K_{34}}{K_0} \text{th} b_3 \text{th} b_4 \right) + \\ + \frac{K_{13}}{K_0} \text{th} b_3 + \frac{K_{14}}{K_0} \text{th} b_4 \end{array} \right] \right\}. \end{aligned}$$

Перетворимо коефіцієнти при $\text{th} b_{1,2,3}$:

$$\begin{aligned} \frac{K_{34}}{K_0} = & \frac{\text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{14}) + \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24})}{1 + \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24})} = \\ = & \text{th} \left[\begin{array}{l} \text{Arth}(\text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{14})) + \\ + \text{Arth}(\text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24})) \end{array} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{K_{13}}{K_0} = & \frac{-\text{th}(2R_{13}) - \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24})}{1 + \text{th}(2R_{13}) \text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24})} = \\ = & -\text{th} \left[2R_{13} + \text{Arth}(\text{th}(2R_{14}) \text{th}(2R_{23}) \text{th}(2R_{24})) \right]; \end{aligned}$$

$$K_{14}/K_0 = \frac{-\operatorname{th}(2R_{14}) - \operatorname{th}(2R_{13})\operatorname{th}(2R_{23})\operatorname{th}(2R_{24})}{1 + \operatorname{th}(2R_{13})\operatorname{th}(2R_{14})\operatorname{th}(2R_{23})\operatorname{th}(2R_{24})} = -\operatorname{th}\left[2R_{14} + \operatorname{Arth}\left(\frac{\operatorname{th}(2R_{13})\operatorname{th}(2R_{23})\times}{\times\operatorname{th}(2R_{24})}\right)\right].$$

Продовжимо спрощення далі. Нехай

$$R_{23} = R_{24} = 0.$$

Опосередкований вплив слабкого сигналу на сильний вважаємо несуттєвим. Тоді ППП по дискретному параметру $r_1 = \overline{0,1}$ матиме суттєво спрощений вид:

$$r_1^* = \operatorname{rect}\left\{-\left[\operatorname{th}b_1 - \operatorname{th}(2R_{13})\operatorname{th}b_3 - \operatorname{th}(2R_{14})\operatorname{th}b_4 + \operatorname{th}(2R_{13})\operatorname{th}(2R_{14})\operatorname{th}b_1\operatorname{th}b_3\operatorname{th}b_4\right]\right\} = \operatorname{rect}\left\{-\operatorname{th}b_1\left[1 + \operatorname{th}(2R_{13})\operatorname{th}(2R_{14})\operatorname{th}b_3\operatorname{th}b_4\right] + \operatorname{th}(2R_{13})\operatorname{th}b_3 + \operatorname{th}(2R_{14})\operatorname{th}b_4\right\} = \operatorname{rect}\left[-\operatorname{th}b_1 + \operatorname{Arth}\left(\operatorname{th}(2R_{13})\operatorname{th}b_3\right) + \operatorname{Arth}\left(\operatorname{th}(2R_{14})\operatorname{th}b_4\right)\right].$$

Вираз для імовірності помилки в оцінці ДП r_1 корисного сигналу в загальному випадку має вигляд

$$P_{\text{ном}} = \frac{1}{2^3} \sum_{r_1^k=0}^1 \sum_{r_3^k=0}^1 \sum_{r_4^k=0}^1 p(r_1^{k*} = 1 - r_1^k / r_1^k, r_3^k, r_4^k); \quad (4)$$

$$r_{1,3,4} = \overline{0,1}.$$

За умови рівноімовірних станів ДП r_1^k, r_3^k, r_4^k тобто,

$$p(r_{1,3,4} = 0) = p(r_{1,3,4} = 1) = 0,5$$

необхідно буде обраховувати не вісім, а лише чотири умовних за станами ДП (табл. 1) імовірностей в співвідношенні (4).

Таблиця 1 – Рівноімовірні стани ДП

r_1^k	0	0	0	0
r_3^k	0	0	1	1
r_4^k	0	1	0	1

Це обумовлене тим, що $p(r^* = 1 - r_1 / \dots)$ не залежить від $r_1 = \overline{0,1}$, а рівноімовірні стани r_3^k і r_4^k (рис. 1) розташовані на вісі часу синхронно.

Далі (див. позначення в (3)):

$$P(r_1^{k*} = \frac{1-r_1^k}{r_1^k}, r_3^k, r_4^k) = \frac{1+(-1)^{r_1^{k*}}}{2} - (-1)^{r_1^{k*}} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \omega(b_1, b_3, b_4, r_1^k, r_3^k, r_4^k) db_1 db_3 db_4. \quad (5)$$

де $\omega(\cdot)$ – тривимірна гаусівська щільність імовірності, умовна за станами ДП r_1^k, r_3^k, r_4^k ,

$$\omega_3(b_1, b_3, b_4, r_1^k, r_3^k, r_4^k) = \frac{1}{\sigma_1\sigma_3\sigma_4\sqrt{(2\pi)^3 D}} \times \exp\left[-\frac{1}{2D} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{D_{ij}}{\sigma_i\sigma_j} (b_i - m_i)(b_j - m_j)\right]. \quad (6)$$

Математичні сподівання при такій щільності мають вигляд:

$$m_1 = 2h_1^2 \left[(-1)^{r_1^k} + (-1)^{r_3^k} \cdot \frac{\rho_{13}}{l_{13}^2} + (-1)^{r_4^k} \cdot \frac{\rho_{14}}{l_{14}^2} \right];$$

$$m_3 \triangleq m_{31} = 2h_1^2 \left[(-1)^{r_1^k} \cdot \frac{\rho_{13}}{l_{13}^2} + (-1)^{r_3^k} \cdot \frac{1}{l_{13}^2} \right];$$

$$m_4 \triangleq m_{41} = 2h_1^2 \left[(-1)^{r_1^k} \cdot \frac{\rho_{14}}{l_{14}^2} + (-1)^{r_4^k} \cdot \frac{1}{l_{14}^2} \right].$$

Виходячи з того, що $l_{13}^2 = h_1^2 / h_3^2$; $l_{14}^2 = h_1^2 / h_4^2$; визначаємо відповідно, інші статистичні характеристики:

$$\sigma_1 = \sqrt{2h_1^2}; \quad \sigma_3 = \sqrt{2h_3^2} \sqrt{2h_1^2 / l_{13}^2};$$

$$\sigma_4 = \sqrt{2h_4^2} \sqrt{2h_1^2 / l_{14}^2};$$

$$h_1^2 = \frac{A_1^2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos \omega t dt; \quad h_3^2 = h_4^2 = \frac{A_2^2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos \omega t dt;$$

$$\rho_{13} = R_{13} / \sqrt{h_1^2 h_3^2}; \quad \rho_{14} = R_{14} / \sqrt{h_1^2 h_4^2}.$$

Виконаємо тепер зручне для розрахунків центрування та нормування випадкових величин $b_1, b_3 \triangleq b_{31}, b_4 \triangleq b_{41}$:

$$x_i = \frac{1}{\sigma_i} (b_i - m_i), \quad i = 1, 3, 4.$$

Введемо позначення:

$$x_1 = \left[b_1 - m_1(r_1^k, r_3^k, r_4^k) \right] / \sqrt{2h_1^2};$$

$$x_3 \triangleq x_{31} = \left[b_3 - m_3(r_1^k, r_3^k) \right] / \sqrt{2h_1^2 / l_{13}^2};$$

$$x_4 \triangleq x_{41} = \left[b_4 - m_4(r_1^k, r_4^k) \right] / \sqrt{2h_1^2 / l_{14}^2}.$$

Тоді (6) перепишеться у вигляді:

$$\omega(x_1, x_2, x_3, \rho_{13}, \rho_{14}, 0) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 D}} \exp\left[-\frac{1}{2D} \sum_{i=1,3,4} \sum_{j=1,3,4} D_{ij} x_i x_j\right], \quad (7)$$

де $D = 1 - \rho_{13}^2 - \rho_{14}^2; \quad D_{11} = 1; \quad D_{33} = 1 - \rho_{33}^2;$

$$D_{44} = 1 - \rho_{13}^2; \quad D_{13} = D_{31} = -\rho_{13};$$

$$D_{14} = D_{41} = -\rho_{14}; \quad D_{34} = D_{43} = \rho_{13}\rho_{14}.$$

Вираз (5) для умовної імовірності помилки тепер буде мати вигляд (нехай для прикладу $r_1^k = 0$):

$$P(r_1^{k*} = 1 / r_1^k = 0, r_3^k, r_4^k) = \left(\xi = B_1 - m_1(r_1^k = 0, r_3^k, r_4^k) \right) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\xi} \omega(x_1, x_{31}, x_{41}, \rho_{13}, \rho_{14}) dx_1 dx_{31} dx_{41}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad B_1 \triangleq B_1(x_{31}, x_{41}) &= B_1 \left[\sqrt{2h_1^2 / l_{13}^2} x_{31} + \right. \\ &+ m_{31}(r_1^k = 0, r_3^k) \sqrt{2h_1^2 / l_{41}^2} x_{41} + m_{41}(r_1^k = 0, r_4^k) \left. \right] = \\ &= \text{Arth} \left[\text{th} \left(\sqrt{2h_1^2 / l_{31}^2} x_{31} + m_{31}(r_1^k = 0, r_3^k) \right) \text{th}(2R_{13}) \right] + \\ &+ \text{Arth} \left[\text{th} \left(\sqrt{2h_1^2 / l_{41}^2} x_{41} + m_{41}(r_1^k = 0, r_2^k, r_1^{k+1}) \right) \text{th}(2R_{14}) \right]. \end{aligned}$$

Результати розрахунків із застосуванням (4,7,8) наведені на рис. 1.

Висновки

Одержані результати свідчать про високу ефективність методів оптимального багатокористувачького детектування двох взаємно заважаючих ЦС QPSK.

В постановці вищевикладеної задачі передбачалось точне знання векторів всіх неінформаційних параметрів обох взаємно неортогональних сигналів. Тому помилки в компенсації впливу завади (у нашому прикладі – другого сигналу) залежать виключно від імовірності помилки в оцінці її невідомих ДП r_3, r_4 . Завдяки цьому негативний вплив завади стрімко зменшується при перевищенні її миттєвої потужності над миттєвою потужністю корисного сигналу на декілька (шість або більше) децибел.

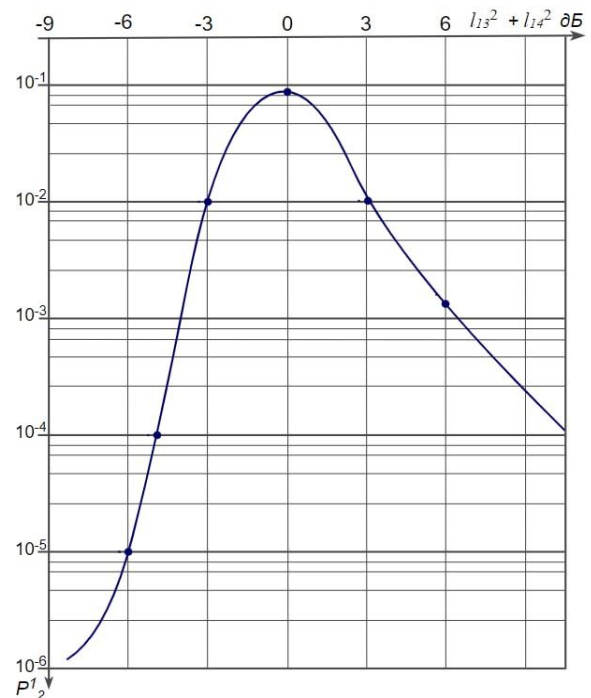


Рис. 1. Залежність умовної імовірності помилки в оцінці ДП r_1 від відношення середніх потужностей сигналів

Найкращі результати можна одержати при обробці заважаючого сигналу не тільки на довжині тактового інтервалу корисного сигналу, а на повній довжині двох тактових інтервалів заважаючого сигналу, суміжних з тактовим інтервалом корисного сигналу, якщо сигнали виявляються асинхронними за тактовими точками.

При перевищенні миттєвої потужності одного з заважаючих сигналів над другим на 3-6 дБ (в залежності від коефіцієнтів неортогональності ρ_{13}, ρ_{14}) імовірність помилки в кожному з них наближається до імовірності помилки в менш потужному сигналі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бураченко Д.Л. Оптимальное разделение цифровых сигналов многих пользователей в линиях и сетях связи в условиях помех. Ленинград: ВАС, 1990. 302 с.
2. Єрохін В.Ф., Пелешок Є.В. Оптимальні алгоритми розділення двох взаємно неортогональних сигналів. *Вісник НТУУ КПІ. Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2012. Вип. 49. С. 33–41.
3. Єрохін В.Ф., Карплюк В.В. Алгоритм компенсації подібної сигналу асинхронної завади з двійковою фазовою маніпуляцією. *Спеціальні телекомунікаційні системи та захист інформації*. 2017. Вип. 2 (2). С. 27–35.
4. Verdu S. Multiuser Detection. C.: Cambridge University Press, 1998. 474 p.

Received (Надійшла) 24.05.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.08.2022

Synthesis method of suboptimal separation-demodulation algorithm of two mutually non-orthogonal QPSK signals

Yevhen Peleshok, Serhii Vovk, Khrystyna Solovei

Abstract. The purpose of the work is to improve the immunity of reception (demodulation) of a useful CS with QPSK under the influence of powerful similar interference. **Formulation of the problem.** Develop a rule for making a decision about the transferred DP of a useful CA with QPSK under the influence of strong QPSK interference. **Results.** The article presents the synthesis of a suboptimal demodulation algorithm of two synchronous mutually non-orthogonal digital signals with QPSK modulation. In the absence of interference, this algorithm degenerates into the classic coherent demodulation of a digital signal with QPSK. **Conclusion.** When the instantaneous power of the interference is significantly higher than the instantaneous power of the useful digital signal with QPSK, the immunity of reception of the latter approaches the immunity of reception in a channel with additive white Gaussian noise without interference.

Keywords: QPSK modulation, BPSK modulation, digital signal, demodulation, mutually non-orthogonal signal.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аль-Амморі Алі	4	Івохін Є. В.	71	Оленченко В. Т.	75
Аль-Амморі Х. А.	4	Івохіна К. Є.	60	Осіпчук А. О.	8
Бабич О. О.	13	Капітон А.	33	Пашенко Р. Е.	78
Барабаш О.В.	54	Карлов В. Д.	121	Пелешок Є. В.	128
Бараненко Р.	33	Клочан А. Є.	4	Петрушенко І. М.	121
Баранов Г. Л.	49	Козлов В. Є.	75	Плешкань Д. П.	22
Барвінський О. П.	13	Козлов Ю. В.	75	Полева Н. М.	4
Беркман Л. Н.	54	Коломійцев О. В.	121	Поліщук Л. І.	93
Боряк Б. Р.	22	Комісаренко О. С.	49	Раківська А. Ю.	116
Вовк С. І.	128	Конецька О. О.	112	Раківський Д. Ю.	116
Войтенко С. С.	13	Кравчук В. І.	49	Резанов Б. М.	88
Гавриленко В. В.	60	Красношарпа І. В.	121	Рець В. О.	71
Галай В. М.	22	Кузнєцов О. Л.	121	Рудоман Н. В.	60
Гапон А. І.	18	Курило А. В.	112	Свинчук О. В.	54
Гейко Г. В.	45	Лаптев О. А.	54	Скорodelов В. В.	45
Голь В. Д.	116	Лещинська І. О.	99	Смірнов О. А.	93
Горський О.	104	Лещинський В. О.	99	Смірнов С. А.	93
Дегтярьова А. О.	4	Леві Л. І.	36	Смірнова Т. В.	93
Денисенко М. А.	18	Ліпчанська О. В.	45	Соловей Х. І.	128
Деркач Т.	64	Марюшко М. В.	78	Струцінський О. В.	121
Дмитренко А.	64	Махно М. Ф.	71	Тищенко Д.	33
Дмитренко Т.	64	Мосов С.	104	Ткаченко О. М.	54
Дмитрієв С. О.	8	Мошаренков В. В.	13	Триснюк В. М.	112
Дрючко О. Г.	22	Мураховська О. А.	39	Триснюк Т. В.	112
Євсіна Н. О.	18	Мусієнко А. П.	54	Українець Н. А.	39
Заліський М. Ю.	8	Нагорний Є. І.	112	Франчук Т.	33
Захарченко Р. В.	22	Новикова О. О.	75	Чалий С. Ф.	99
Зуєв А. О.	18	Носков В. І.	45	Шефер О. В.	22
Іванюта М. В.	49	Окоро О. Ч.	8	Якименко Н. М.	93

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 3 (69)

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. Львіна*

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

Підписано до друку 04.10.2022. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 16,75. Тираж 120 прим. Зам. 1004-22

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. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34

e-mail: bookfabrik@mail.ua