

Національний університет  
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

National University  
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

# СИСТЕМИ управління, навігації та зв'язку

# Control, navigation and communication systems

Випуск 1 (67)

Issue 1 (67)

## 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 = **81.37**),  
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 01 квітня 2022 року № 10).*

*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 Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Одеса, Україна*);  
ВЕСОЛОВСЬКИЙ Кшиштоф  
(*д-р техн. наук, проф., Польща*);  
ГАВРИЛКО Євген Володимирович  
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);  
ГАШИМОВ Ельшан Гіяс огли  
(*д-р наук, проф., Баку, Азербайджан*);  
ГЛИВА Валентин Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ДАКІ Олена Анатоліївна  
(*д-р техн. наук, доц., Ізмаїл, Україна*);  
ЗАЩЕПКИНА Наталія Миколаївна  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
КАСАТКИНА Наталія Вікторівна  
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);  
КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович  
(*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*);  
ПАВЛЕНКО Максим Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
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., Харків, 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, доц., 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*);  
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*);  
Maksim PAVLENKO  
(*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., Kharkiv, 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.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine*).

### Technical secretary:

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

# З М І С Т

## НАВІГАЦІЯ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

<i>Андрєєв С. М., Горелик С. І., Нечаєсов А. С., Саул-Гоє Д. К.</i> Застосування геоінформаційних технологій для побудови картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ .....	4
<i>Бандурка О. І., Свинчук О. В.</i> Метод ідентифікації космічних знімків для прогнозування лісових пожеж .....	13

## УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Гапон Д. А., Денисенко М. А., Зуєв А. О., Леценко В. М., Лунін Д. О.</i> Система управління сушінням капілярно-пористих матеріалів за допомогою квадратичного функціоналу .....	19
<i>Заповловський М. Й., Зиков І. С., Мезенцев М. В., Носков В. І.</i> Оптимізаційна модель електропотяга з електроприводом постійного струму .....	23
<i>Калінін Є. І., Кусков М. А., Бельорін-Еррера О. М.</i> Особливості повороту шарнірно-зчленованого трактора .....	30
<i>Шефер О. В., Лактіонов О. І., Михайленко О. В.</i> Дослідження процесу прийняття рішень у складних технічних системах .....	34

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Barabash O., Kolumbet V.</i> Multiagent approach to computer management in a heterogeneous distributed computer environment .....	38
<i>Барковська О. Ю., Холєв В. О., Поліканов Д. А.</i> Значущість обчислювальних систем із масовим паралелізмом при обробці сканованих документів .....	43
<i>Волк М. О., Лунічкін О. Г.</i> Комп'ютерні системи із самовідновленням .....	48
<i>Гавриленко С. Ю., Зозуля В. Д.</i> Дослідження методів виявлення аномалій на етапі попередньої обробки даних .....	52
<i>Голубничий Д. Ю., Коломійцев О. В., Третьяк В. Ф., Ключка Я. О., Рибальченко А. О.</i> Архітектура системи обміну медичними даними пацієнтів з лікарями на основі ІОТА .....	57
<i>Kapiton A., Baranenko R., Franchuk T., Diachenko O.</i> Information system of legal protection of intellectual property .....	62
<i>Krasnobayev Victor, Koshman Sergey, Kovalchuk Dmytro.</i> The concept of using the number system in the residual classes for building artificial intelligence system .....	65
<i>Малохвій Е. Е., Молчанов Г. І., Паржєн Ю. В.</i> Дослідження протоколів передачі даних в умовах Інтернету речей .....	71
<i>Martovytskyi V., Koltun Y., Holubnychyi D., Sukhoteplyi V.</i> Technology for monitoring the functioning state of distributed computer systems .....	75
<i>Сисоєв І. К., Гавриленко В. В.</i> Адаптивний алгоритм балансування навантаження в додатках з використанням технології контейнеризації .....	81
<i>Смірнова Т. В., Константинова Л. В., Смірнов С. А., Якименко Н. М., Смірнов О. А.</i> Дослідження стійкості до лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах .....	84
<i>Чуйко О. А., Лисиця Д. О., Кучук Г. А.</i> Програмно-апаратний комплекс керування сценічним освітлювальним обладнанням .....	90
<i>Шаповалова С. І., Гулак О. С.</i> Блокчейн технології в банківській сфері .....	94
<i>Янко А. С., Мартиненко А. М., Трикоз В. В.</i> Мережні сенсори та детектори, як ефективний інструмент моніторингу даних .....	98
<i>Янковський О. А., Янковська Д. О., Полікарпова Г. В.</i> Автоматизована система для моделювання термічних опіків шкіри у експериментальних тварин .....	102
<i>Ярошевич Р. О., Коваленко А. А.</i> Аналіз технологій підвищення ефективності Тактильного Інтернету у комп'ютерних мережах .....	106

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Іванець Г. В., Іванець М. Г., Толкунов І. О., Попов І. І.</i> Методика підвищення точності прогнозування надзвичайних ситуацій природного характеру на основі методу попарного врахування аргументів .....	111
<i>Ковальова А. В.</i> Оцінка і класифікація виробничого ризику при виконанні дорожніх робіт на прикладі міста Києва .....	121
<i>Панова О. В., Фролов В. Ф., Левченко Л. О.</i> Моніторинг низькочастотного звукового та інфразвукового навантаження на виробниче середовище та засоби його зниження .....	127
<i>Урум Н. С., Іваненко В. М., Федунів В. М., Бажак О. В.</i> Застосування індивідуальних рятувальних засобів для виживання екіпажу і пасажирів після покидання судна .....	131
<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	136

## ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПОБУДОВИ КАРТОГРАФІЧНИХ МОДЕЛЕЙ НЕБЕЗПЕЧНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ

**Анотація.** Предметом дослідження є розроблення структури регіональної ГІС моніторингу небезпечних метеорологічних явищ та побудова картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ з використанням даних дистанційного зондування Землі та інших просторових і непросторових даних. **Об'єктом дослідження** є методи застосування геоінформаційних технологій для побудови картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ. **Метою роботи** є підвищення ефективності візуалізації даних небезпечних метеорологічних явищ для підтримки прийняття управлінських рішень з пом'якшення й нейтралізації наслідків несприятливих кліматичних умов і їх дії на суспільство. **Висновки:** Проведено аналіз та визначена класифікація картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ. Розроблено структуру регіональної ГІС моніторингу небезпечних метеорологічних явищ. Розроблені картографічні моделі небезпечних метеорологічних явищ за даними ДЗЗ, які підвищують інформативність метеорологічних даних задля підтримки прийняття управлінських рішень щодо реагування на несприятливі кліматичні процеси та їх наслідки. Побудовані карти небезпечних метеорологічних явищ на прикладі урагану «Ірма» на основі даних ДЗЗ.

**Ключові слова:** небезпечні метеорологічні явища (НМЯ), картографічна модель, кліматичні зміни, дані ДЗЗ.

### Вступ

Небезпечні метеорологічні явища (НМЯ) є одним з основних джерел надзвичайних ситуацій (НС) природного характеру як на території України, так і в світі в цілому. Згідно з існуючими оцінками, на тлі глобальних і регіональних змін клімату, що відбуваються, повторюваність небезпечних метеорологічних явищ, їх інтенсивність і величина збитку, що завдається ними, може істотно зрости.

Таким чином, виникає необхідність комплексної оцінки схильності територій до небезпечних гідрометеорологічних явищ і пов'язаних з ними НС на різних просторових масштабах. На фоні глобальної і регіональної зміни клімату необхідність і важливість дослідження просторово-часового розподілу небезпечних метеорологічних явищ особливо актуально. Небезпечні метеорологічні явища мають вплив на різні сфери життєдіяльності людини і є причиною соціальних, екологічних та економічних збитків.

Важливу роль у вивченні просторово-часового розподілу небезпечних метеорологічних явищ відіграє картографічний метод дослідження. Картографування характеристик небезпечних явищ дозволяє виділяти і в наочній формі відображати області найбільшої частоти та інтенсивності їх прояву. Тому розроблення методів застосування геоінформаційних технологій для побудови картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ дозволить створювати карти, які мають стати важливим інструментом оцінки територіального ризику виникнення небезпечних метеорологічних явищ і пов'язаних з ними надзвичайних ситуацій, а також організації їх моніторингу та підтримки ухвалення управлінських рішень з пом'якшення та нейтралізації їх дії на окрему територію.

**Постановка задачі.** Просторовий розподіл небезпечних метеорологічних явищ характеризується дуже високим ступенем мінливості, яка обумовлена

впливом чинників підстилаючої поверхні. Важливість їх обліку особливо зростає в умовах складного рельєфу. Таким чином геоінформаційні технології дозволяють зробити інтеграцію великого числа різних просторових даних, іншої просторової і непросторової інформації про досліджувані НМЯ і провести комплексний аналіз цих даних.

**Метою роботи** є підвищення інформативності візуальних даних щодо небезпечних метеорологічних явищ для підтримки прийняття управлінських рішень з пом'якшення й нейтралізації наслідків несприятливих кліматичних умов і їх дії на суспільство.

### 1. Визначення та аналіз типових небезпечних метеорологічних явищ

Клімат Землі схильний до природних коливань, але наразі середня температура Землі має стійку динаміку зростання, спричиняючи значну кількість температурних аномалій, не характерних для звичного температурного режиму планети, що постійно фіксується світовими синоптичними центрами (рис. 1-5). Таке зростання пов'язують із парниковим ефектом, який полягає в поглинанні атмосферою Землі частини сонячної енергії. Сонячна енергія, що випромінюється назад в космос з поверхні Землі, поглинається парниковими газами і повторно випромінюється за всіма напрямками. Цей процес призводить до нагріву як земної атмосфери, так і поверхні планети. Без зазначеного ефекту Земля була б приблизно на 30°C холодніше. За думкою вчених, населення планети підсилює природний парниковий ефект, оскільки гази, що виділяються промисловістю і сільським господарством, затримують більше енергії та підвищують температуру. У епоху сучасної зміни клімату спостерігається зростання повторюваності і інтенсивності небезпечних і несприятливих метеорологічних явищ, які можуть викликати надзвичайні ситуації природного характеру (рис. 5).

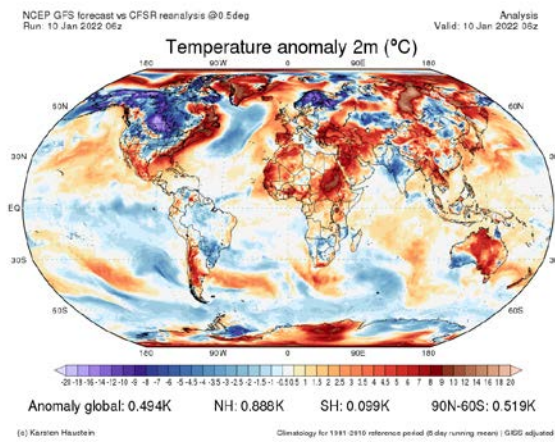


Рис. 1. Карта температурних аномалій Землі станом на 10.01.22 © Karsten Haustein

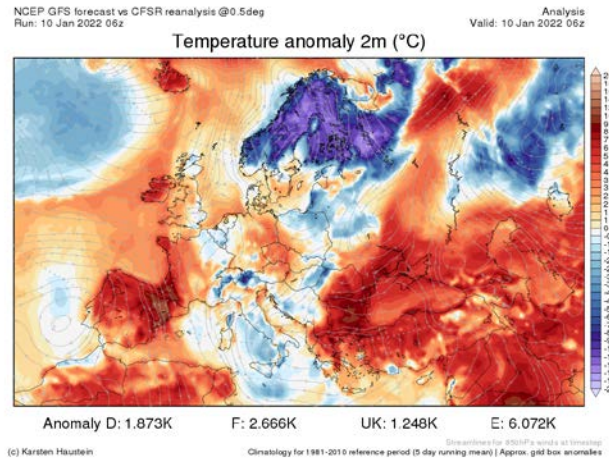


Рис. 2. Карта температурних аномалій Європи станом на 10.01.22 © Karsten Haustein

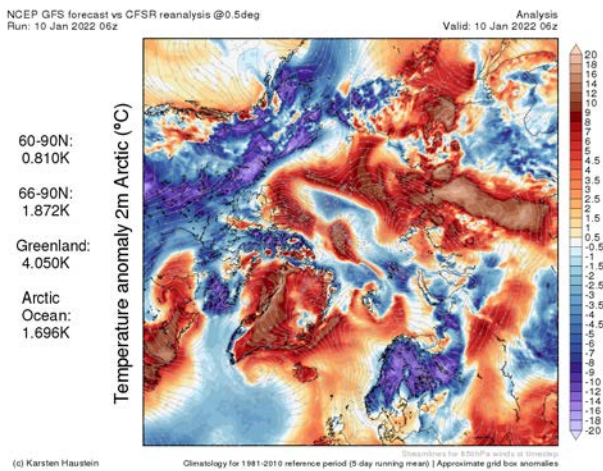


Рис. 3. Карта температурних аномалій Арктики станом на 10.01.22 © Karsten Haustein

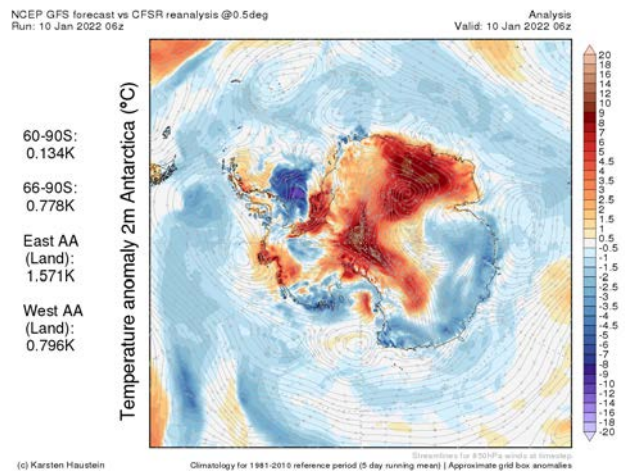
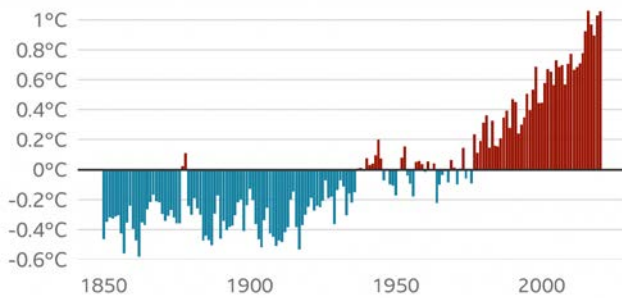


Рис. 4. Карта температурних аномалій Антарктики станом на 10.01.22 © Karsten Haustein



Note: Average calculated from 1951 to 1980 data  
Source: University of California Berkeley

Рис. 5. Графік змін середньої температури Землі з 1800 по 2020 р.

До небезпечних метеорологічних явищ (НМЯ) відносяться явища погоди, які інтенсивністю, тривалістю і часом виникнення представляють загрозу безпеці людей, а також можуть завдати значного збитку галузям економіки, зокрема:

ураганні вітри (тропічні циклони, тайфуни); смерчі (торнадо); шквали; град; ожеледь і паморозь; ожеледиця; завірюхи; зливи; тривалі дощі; снігопади; тумани; грози; заповоріжені бурі; аномальна спе-

ка; пониження горизонтальної і вертикальної дальності видимості.

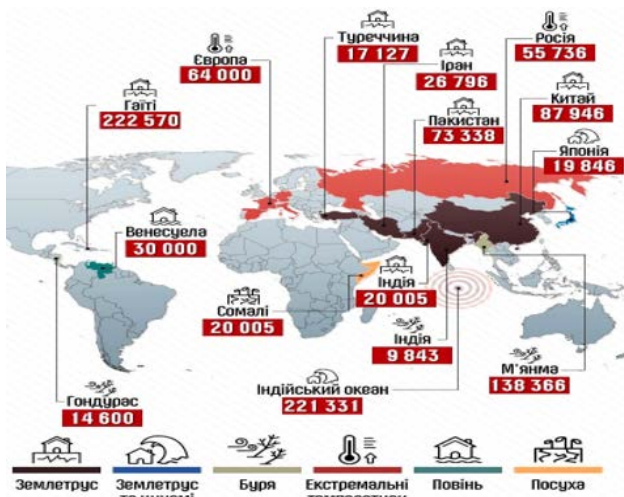
Типовий перелік небезпечних метеорологічних явищ, який розроблений гідрометеоцентром, на підставі якого територіальні управління метеослужб складають уточнений, з урахуванням місцевої специфіки, перелік небезпечних явищ для своєї території, представлений в табл. 1.

Небезпечні метеорологічні явища у ряді випадків призводять до катастрофічних наслідків. Особливо часто під їх дією трапляються повені. Основні райони виникнення тропічних циклонів складають сім фактично відособлених безперервних зон, які мають назву басейнів. Найактивнішою є тихоокеанський басейн, де щорічно виникає більшість тропічних циклонів і тропічних штормів (з 86 в світі).

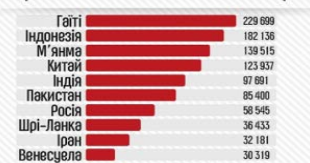
Варто зазначити, що класифікація пошкоджень лише за грошовою оцінкою, що вимірюється у мільярдах доларів етично є не зовсім коректною, адже забирає життя та здоров'я громадян тих держав, де локально розповсюджені ці атмосферні явища. Число жертв може становити десятки тисяч, що обумовлює мету дослідження. Дані представлено на рис. 6.

Таблиця 1 – Класифікація небезпечних метеорологічних явищ

Найменування НМЯ	Характеристики і критерії визначення НМЯ
<b>A.1 Шквальний та потужний вітер</b>	Вітер, що досягає швидкості пориву до 25 м/с, або середньої швидкості не менш, ніж 20 м/с, на морських берегових територіях та гірських районах до 35 м/с, або середньої швидкості не менш, ніж 30 м/с.
<b>A.2 Ураганний вітер (ураган)</b>	Вітер, що досягнув швидкості 33 м/с і більше.
<b>A.3 Шквал</b>	Різке короткочасне (протягом декількох хвилин, але не менше за одну хвилину) посилення вітру до 25 м/с і більш.
<b>A.4 Смерч</b>	Сильний маломасштабний вихор у вигляді стовпа або воронки, направлений від хмари до підстилаючої поверхні.
<b>A.5 Сильна злива</b>	Сильний зливовий дощ з кількістю опадів не менше 30 мм за період, що не більше 1 години.
<b>A.6 Дуже сильний дощ (дуже сильний дощ з снігом, дуже сильний мокрий сніг, дуже сильний сніг з дощем)</b>	Дощ, зливовий дощ, дощ зі снігом, мокрий сніг кількістю не менше ніж 50 мм, в районах з особливою небезпекою до селів, а саме гірських районів – не менше ніж 30 мм за часовими обмеженнями не більше ніж 12 годин.
<b>A.7 Снігопад</b>	Дощ, зливовий дощ з не менше ніж 20 мм опадів за часовими обмеженнями не більше ніж 12 годин.
<b>A.8 Тривалий сильний дощ</b>	Дощ з короткими перервами (не більше 1 ч) з кількістю опадів не менше 100 мм (у зливу небезпечних районах з кількістю опадів не менше 60 мм) за період часу більше 12 год, але менше 48 год, або 120 мм за період часу більше 2 діб.
<b>A.9 Крупний град</b>	Град діаметром 20 мм і більше.
<b>A.10 Сильна завірюха</b>	Перенесення снігу (часто супроводжуваний випаданням снігу з хмар) сильним (із середньою швидкістю не менше 15 м/с) вітром із метеорологічною досяжністю видимості не більше 500 м тривалістю не менше 12 год.
<b>A.11 Сильна заповишена (піщана) буря</b>	Перенесення пороши (піску) сильним (з середньою швидкістю не менше 15 м/с) вітром і з метеорологічною досяжністю видимості не більше 500 м тривалістю не менше 12 год.
<b>A.12 Інтенсивний туман (сильна мла)</b>	Сильне помутніння повітря за рахунок скупчення найдрібніших частинок води (пороши, продуктів горіння), при якому значення метеорологічної досяжності видимості не більше 50 м та тривалістю не меншого 12 ч
<b>A.13 Потужне відкладення ожеледиці</b>	Діаметр відкладення на проводах: ожеледі – діаметром не менше 20 мм; складного відкладення або мокрого (що замерзає) снігу – діаметром не менше 35 мм; паморозь – діаметр відкладення не менше 50 мм
<b>A.14 Потужний мороз</b>	У період з листопада по березень значення мінімальної температури повітря досягає встановленого для даної території небезпечного значення або нижче за нього
<b>A.15 Аномально-холодна погода</b>	У період з жовтня по березень протягом 5 днів і більш значення середньодобової температури повітря нижче за кліматичну норму на 7 °С і більше
<b>A.16 Підвищення температури, невластива сезону</b>	У період з травня по серпень значення максимальної температури повітря досягає встановленого для даної території або вище за нього.
<b>A.17 Заморожування</b>	Пониження температури повітря і/або поверхні ґрунту до значень нижче 0°С на тлі позитивних середніх добових температур повітря в періоди активної вегетації сільгоспкультур або збирання врожаю, що приводить до їх пошкодження, а також до часткової або повної загибелі урожаю
<b>A.18 Аномально посушлива погода</b>	У період з квітня по вересень протягом 5 днів і більш значення середньодобової температури повітря вище за кліматичну норму на 7 °С і більше
<b>A.19 Надзвичайна пожежна небезпека</b>	Показник пожежної небезпеки відноситься до 5-го класу (10 000 °С за формулою Нестерова)



Країни з найбільшою кількістю жертв



Найбільші катаклізми-вбивці



Рис. 6. Кількість жертв від природних небезпечних гідрометеорологічних явищ у світі 1996-2021

## 2. Сучасний стан картографування небезпечних метеорологічних явищ

Карти небезпечних гідрометеорологічних явищ є важливою складовою для забезпечення безпеки населення, оскільки вони дають уявлення про характер, інтенсивність і періодичність можливих погроз для певної території, а також служать основою для

прогнозування вірогідності виникнення даних явищ. В Україні і за кордоном накопичено значний досвід створення карт небезпечних природних явищ. Практику перших спроб відображення таких процесів на картах території України відносять до початку ХХ в.

НМЯ можна класифікувати за двома ознаками:

1) напряму тематичного картографування небезпечних природних явищ;

2) просторової визначеності території, що відображається на карті.

З погляду напрямів картографування небезпечних природних явищ всі наявні карти можна згрупувати таким чином:

- карти режимних характеристик небезпечних явищ;
- карти місць фіксації небезпечних явищ;
- карти заподіяного небезпечним природним явищем збитку;
- карти безпеки, ризику і вірогідності виникнення надзвичайних ситуацій і оцінки можливих втрат внаслідок небезпечних явищ.

До карт режимних характеристик небезпечних явищ відносять карти їх повторюваності та інтенсивності. Вони, як правило, створюються в науково-освітніх цілях і для супроводу завдань моніторингу, оскільки відображають ареали найбільш частого виникнення небезпечних явищ і їх найбільшої інтенсивності. Карти повторюваності відображають закономірності розподілу випадків небезпечних явищ у часі та просторі. Вони створюються на основі аналізу багаторічних рядів даних метеорологічних і гідрологічних спостережень. Карти інтенсивності небезпечних явищ переважно відображають їх кількісні (включаючи екстремальні) і якісні характеристики. Основним джерелом інформації для картографування інтенсивності НМЯ є оперативні і архівні дані наглядової мережі. Виділяють такі типи карт НМЯ:

– карти режимних характеристик явищ;

– карти місць фіксації явищ;

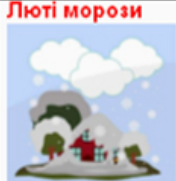
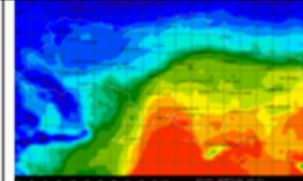

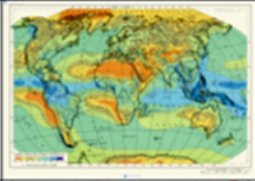
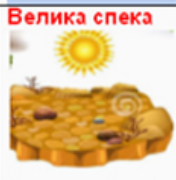




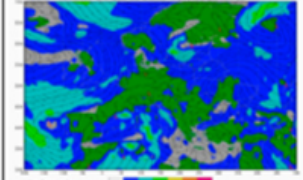

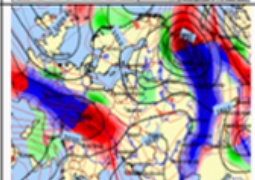
– карти характеристик збитку, пов'язаного з НМЯ;

– карти безпеки, ризику і вірогідності виникнення НС.

Карти небезпечних метеорологічних явищ створюються на глобальному, макрорегіональному, національному і регіональному рівнях. В більшості випадків просторово-часовий розподіл небезпечних явищ вивчається в масштабах окремих країн і їх груп, що обумовлене більшою доступністю початкової інформації. Прикладом залежності картографічної моделі від небезпечного метеорологічного явища може слугувати табл. 2, що була створена на основі даних табл. 1 з типовою класифікацією і характером метеорологічного явища та візуалізує природний характер небезпечних метеорологічних явищ у вигляді картографічних моделей.

Карти небезпечних метеорологічних явищ створюються на глобальному, макрорегіональному, національному і регіональному рівнях. В більшості випадків просторово-часовий розподіл небезпечних явищ вивчається в масштабах окремих країн і їх груп, що обумовлене більшою доступністю початкової інформації. Прикладом залежності картографічної моделі від небезпечного метеорологічного явища може слугувати табл. 2, що була створена на основі даних табл. 1 з типовою класифікацією і характером метеорологічного явища та візуалізує природний характер небезпечних метеорологічних явищ у вигляді картографічних моделей.

Таблиця 2 – Візуалізація різних типів НМЯ за допомогою картографічних моделей

<b>Люті морози</b> 	Карти аномально низьких температур		<b>Сильні дощі</b> 	Карти аномально сильних дощів Карти середнь-орічного добового максимуму опадів	
<b>Велика спека</b> 	Карти аномально високих температур		<b>Сильні снігопади</b> 	Карти аномально сильних снігопадів Карти висоти сніжного покриву	
<b>Великі вітри і завірюхи</b> 	Карти аномальних вітрів		<b>Конвективні небезпечні явища</b> 	Карти ураганів і смерчів Карти повторюваності небезпечних конвективних явищ	

### Структура регіональної ГІС моніторингу небезпечних метеорологічних явищ

За практикою та дослідженнями минулого десятиріччя відбувається інтенсивний розвиток технологій моніторингу і прогнозування небезпечних гідрометеорологічних явищ. Перш за все, варто виділити методи дистанційного зондування, що забезпечують моніторинг з високим просторово-часовим дозволом. Основною метою створення методики є своєчасний та професійний підхід до вирішення або прогнозування будь якої ситуації, що пов'язана з

атмосферними явищами. Створення якісної БД, можливість постановки якісної задачі на збір, обробку, систематизацію інформації задля якісної візуалізації пересічними користувачам, які можуть і не бути спеціалістами в галузі кліматології, метеорології, ГІС-спеціалістами.

Типова структура регіональною ГІС моніторингу небезпечних метеорологічних явищ представлена на рис. 7, де типовою першою ланкою процесу є збір інформації (дані спостереження та ДЗЗ у вигляді супутникової зйомки), а завершальною – якісна візуалізація процесу чи явища. У сучасних умовах, для під-

вищення якості прогнозу небезпечних гідрометеорологічних явищ і зниження збитку від них, виникає необхідність створення інформаційної системи збору, узагальнення, аналізу і представлення даних про небезпечні природні явища, на основі існуючих засобів наземного, космічного моніторингу і моделювання.

Ефективно подібні завдання вирішуються в середовищі геоінформаційних систем (ГІС). Таким чином, створення регіональної інформаційної системи моніторингу небезпечних гідрометеорологічних явищ для розвитку і доповнення існуючої системи, є важливим та перспективним напрямком.



Рис. 7. Структура регіональної ГІС моніторингу та прогнозування НМЯ

### 3. Побудова картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ з використанням даних ДЗЗ на прикладі урагану «Ірма»

Для розроблення та впровадження системи моніторингу та аналізу впливу небезпечних метеорологічних явищ розглянемо основні етапи побудови картографічної моделі НМЯ на прикладі урагану «Ірма», що мав значний вплив на Атлантичний океан та Північну Америку. Урагани формуються як циклони в тропічному поясі над світовим океаном, коли температура води перевищує 26°C. Це перша необхідна умова, що забезпечує сильне випаровування з поверхні океану, насичує вихри водяною паром. Друга необхідна умова має менший вплив – це малий градієнт (перепад) швидкості вітру по висоті вихору, який підтримує конвективні хмари і не дає циклону розпатися на дрібні вихори. Відомий ряд супутніх чинників: різкий температурний контраст поверхні океану, сходження купчастих хмар та інше. Відмічені кореляції ураганів з іншими погодними явищами: циркуляцією вітрів в стратосфері, дощами в Західній Африці, явищем загадкового потепління води в Тихому океані.

Атлантичний сезон ураганів (Atlantic Hurricane Season) – умовна назва щорічного періоду формування найбільш інтенсивних ураганів в середній частині північної половини Атлантичного океану. Як правило сезон ураганів триває з 1 червня по 30 листопада. Пік спостерігається близько 10 вересня.

Шкала ураганів Саффіра-Сімпсона є шкалою для вимірювання потенційного збитку від ураганів, розроблена Гербертом Саффіра (1917-2007) і Робертом Сімпсоном (1912-2014) на початку 1970-х років. Використовується починаючи з сезону 1973 року. Вона заснована на швидкості вітру і включає оцінку штормових хвиль в кожній з 5 категорій: мінімальна, помірна; значна; велика; катастрофічна.

В табл. 3 приведена класифікація категорій шкали залежно від швидкості вітру і висоти вітрового нагання. Ураган «Ірма» - був сформований на півдні островів Кабо-Верде 30 серпня 2017 року, як це вказано на рис. 8. Бура швидко стала основним ураганом 3-ої категорії 31 серпня, коли вона поволі перемістилася через Атлантику. 5 вересня «Ірма» стала ураганом 5 категорії і завдала катастрофічних наслідків на Карибських островах, на Малих Антильських островах і декількох інших островах Карибського моря. Вихід на материкову частину ураган «Ір-



ма» зробив як буревій 4 категорії 10 вересня. Він супроводжувався сильними штормовими вітрами, що уразили район Чарльстона 11 вересня. «Ірма» встановила нові рекорди.

В результаті аналізу було отримано інформацію щодо урагану «Ірма»: **сформувався**: 30 серпня 2017; **розпався**: 12 вересня 2017; **максимальний вітер**:

295 км/год; **нижній тиск V**: 926 мБар (гПа; 694.56 мм Нг); **кількість загиблих**: 134 людини; **фінансові збитки**: \$ 64.655 млрд; **області розповсюдження**: Антильські острови, Флорида; **сезонність**: входить в сезон атлантичних ураганів 2017 року. Наслідки урагану «Ірма» за даними ДЗЗ, що отримано з БПЛА, наведено на рис. 9.

Таблиця 3 – Характеристики категорій шкали Саффіра-Сімпсона

Категорія	Швидкість вітру, м/с (км/год)	Висота хвилі вітрового нагання, м
5	> 70 (250)	> 5,5
4	58-70 (210—250)	4—5,5
3	50-58 (180—210)	2,5—4
2	42-50 (150—180)	2—2,5
1	33-42 (120—150)	1—2
Додаткові категорії		
Тропічний шторм	17-33 (60—120)	0—1
Тропічна депресія	< 17 (60)	0



Рис. 8. Треки руху ураганів в 2017-2019 році в Атлантичному океані



Рис. 9. Наслідки урагану «Ірма» за даними ДЗЗ, що отримано з БПЛА

Для визначення напрямку проходження ураганів необхідно побудувати картографічну модель небезпечних метеорологічних явищ, на яку нанесені результати спостережень в цифровому або символічному вигляді, отримані в певні моменти часу.

Для досягнення поставленої мети було визначено програмне забезпечення ArcGIS 10.5, інструментарій якого містить функції для побудови картографічних моделей і візуалізації динамічних процесів НМЯ.

На рис. 10 відображено структурну схему побудови картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ на прикладі урагану «Ірма». Подану структурну схему можливо адаптувати для візуалізації різних типів НМЯ.

Задля якісного планування та дослідження метеорологічного явища урагану «Ірма» налаштовуємо та працюємо з атрибутивною та просторовою інформацією для складання БД (рис. 11).

Наступний етап роботи - візуалізація розповсюдження урагану, або будь якого несприятливого розвитку ситуації.

Для реалізації етапу необхідно створити та опрацювати share-файл або клас просторових даних, що описано у структурі регіональної ГІС-системи моніторингу за даними ДЗЗ.

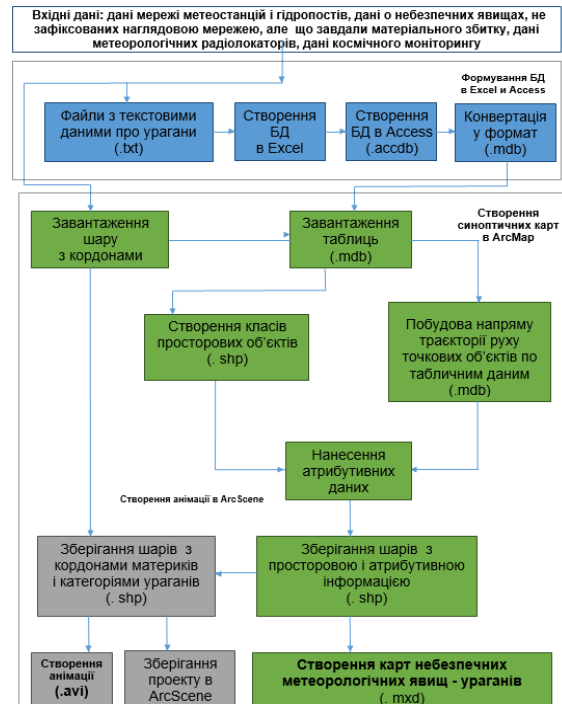
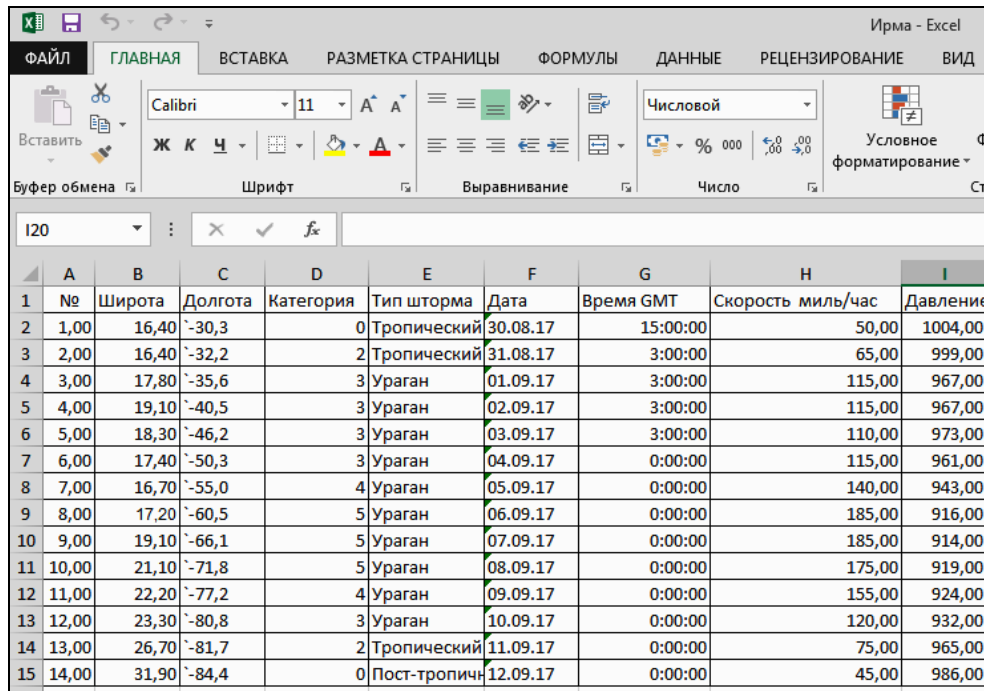


Рис. 10. Структурна схема побудови картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ на прикладі урагану «Ірма»

Кінцевий результат усіх виконаних дій та налагодження особистого алгоритму виглядатиме як самостійне рішення програмного продукту ArcGIS з маркованими об'єктами, що полегшить сприйняття як для пересічних користувачів, так і для розробників, які працюватимуть із інформацією, яка форму-

ватиме зміст створеної БД. Для відображення інформації щодо урагану були використані точкові об'єкти, які були підписані відповідним чином. Для цього використовується параметр «Надписати об'єкти» при виборі кожного з відображених шарів. Результат представлений на рис. 12.



№	Широта	Долгота	Категория	Тип шторма	Дата	Время GMT	Скорость миль/час	Давление
1,00	16,40	-30,3	0	Тропический	30.08.17	15:00:00	50,00	1004,00
2,00	16,40	-32,2	2	Тропический	31.08.17	3:00:00	65,00	999,00
3,00	17,80	-35,6	3	Ураган	01.09.17	3:00:00	115,00	967,00
4,00	19,10	-40,5	3	Ураган	02.09.17	3:00:00	115,00	967,00
5,00	18,30	-46,2	3	Ураган	03.09.17	3:00:00	110,00	973,00
6,00	17,40	-50,3	3	Ураган	04.09.17	0:00:00	115,00	961,00
7,00	16,70	-55,0	4	Ураган	05.09.17	0:00:00	140,00	943,00
8,00	17,20	-60,5	5	Ураган	06.09.17	0:00:00	185,00	916,00
9,00	19,10	-66,1	5	Ураган	07.09.17	0:00:00	185,00	914,00
10,00	21,10	-71,8	5	Ураган	08.09.17	0:00:00	175,00	919,00
11,00	22,20	-77,2	4	Ураган	09.09.17	0:00:00	155,00	924,00
12,00	23,30	-80,8	3	Ураган	10.09.17	0:00:00	120,00	932,00
13,00	26,70	-81,7	2	Тропический	11.09.17	0:00:00	75,00	965,00
14,00	31,90	-84,4	0	Пост-тропич	12.09.17	0:00:00	45,00	986,00

Рис. 11. Фрагмент складеної бази даних для урагану «Ірма»

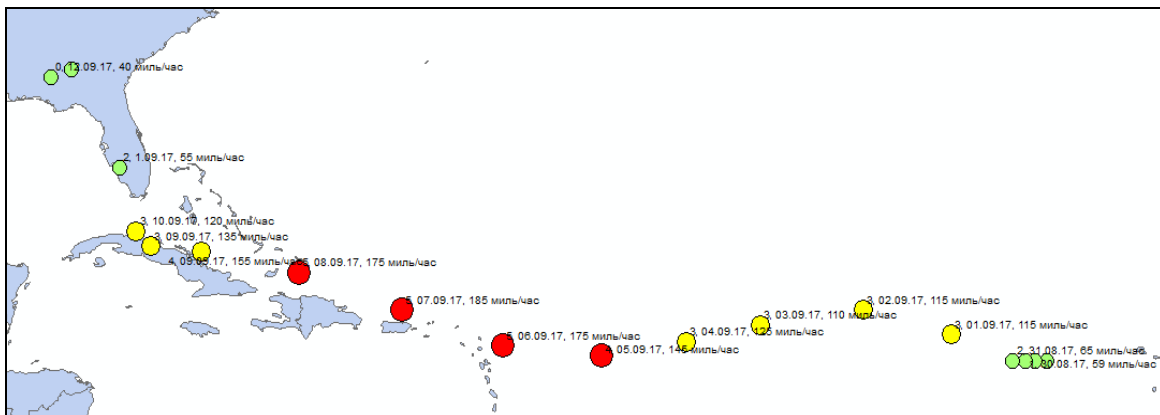


Рис. 12. Результат відображення підписаних атрибутивних та просторових даних урагану «Ірма»

В результаті отримані всі необхідні дані для побудови синоптичної карти для урагану «Ірма». Аналогічним чином були отримані дані для побудови синоптичної карти шарів температур хмар небезпечних метеорологічних явищ (рис. 13, а). В результаті було отримано синоптичні карти небезпечних метеорологічних явищ у вигляді урагану «Ірма», які представлені на рис. 13, б.

Для дослідження хмарного покриву був застосований ArcGIS, який дозволяє як аналізувати контрастні характеристики, так і отримувати їх статистичні значення. Розробка карти проводилася на основі космічних знімків Атлантичного регіону та південно-східної Північної Америки за 2017 рік та share- файлів аналогічної території.

Готове рішення у вигляді карти було отримано саме через застосування методики розробки регіональної ГІС-системи, що може бути адаптована до будь яких часових даних (аналіз можливих майбутніх ураганів або технічне дослідження ураганів минулих років, за які можливо знайти дані). Так само можемо отримати рішення щодо будь яких небезпечних атмосферних явищ, якщо оперуватимемо даними згідно специфіки явища. Потужні та затяжні морози – аналіз за температурою, зливи та інші опади – необхідно знати кількість опадів за певний час.

### Висновки та результати роботи

В процесі дослідження було проведено аналіз та визначена класифікація картографічних моделей

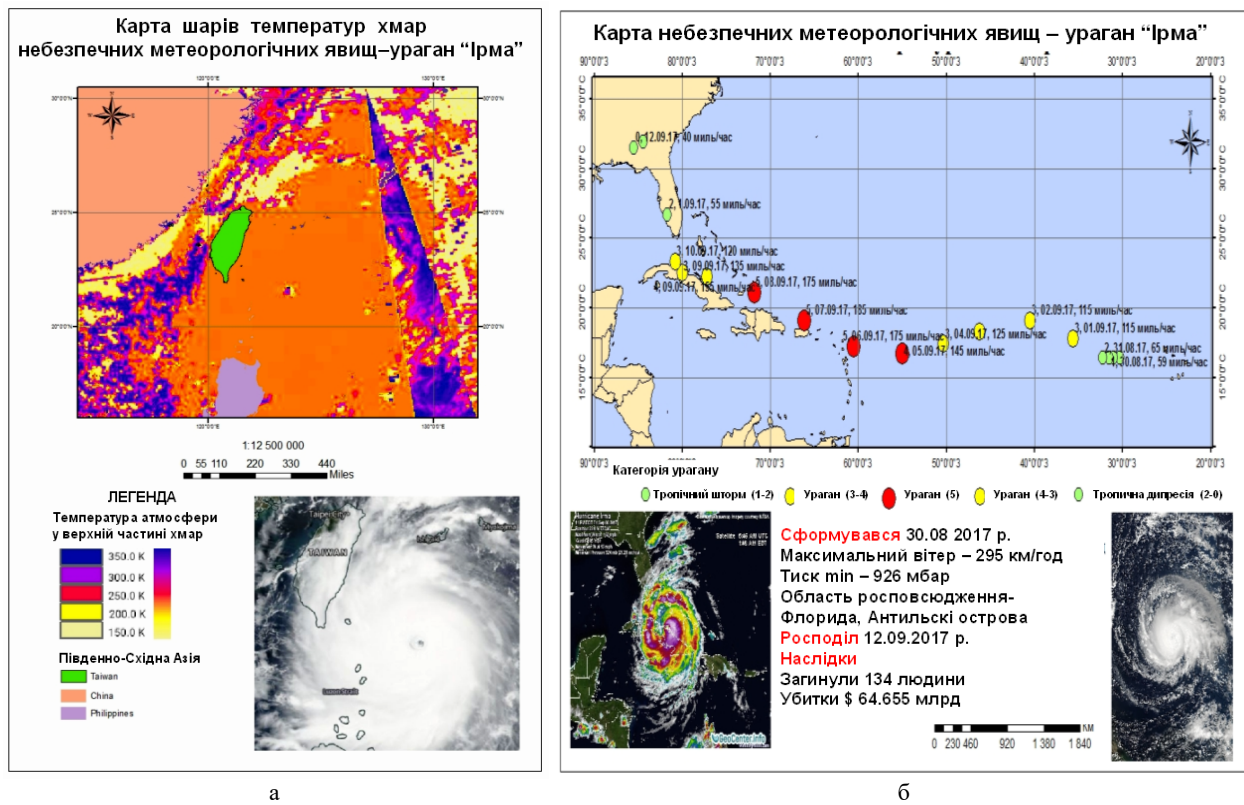


Рис. 13. Синоптична карта активності та розповсюдження урагану «Ірма»

небезпечних метеорологічних явищ, прогнозуванням та контролем яких буде займатися регіональна геоінформаційна система, що матиме унікальну структуру та методику. Запропонована структура регіональної ГІС моніторингу небезпечних метеорологічних явищ у вигляді взаємозв'язків між компонентами збору, введення, обробки та систематизації інформації із подальшою візуалізацією дозволить більш якісно та вчасно реагувати на небезпечні метеорологічні явища. Розроблені картографічні моделі небезпечних метеорологічних явищ за даними ДЗЗ, які підвищують інформативність метеоро-

логічних даних задля підтримки прийняття управлінських рішень щодо реагування на несприятливі кліматичні процеси та їх наслідки. Побудовані карти небезпечних метеорологічних явищ на прикладі урагану «Ірма» на основі даних ДЗЗ.

Роботу запропонованої методики було апробовано на практиці. Створена карта небезпечних метеорологічних явищ на прикладі урагану «Ірма». Наявність атрибутивної та просторової інформації для створення бази даних, вдала візуалізація переміщень урагану доводить ефективність даної методики.

REFERENCES

1. Andreev, S., Volotovskaya, D. & Zhilin, V. (2018), "Development of the clouds types determination method for ordering the optimal temporary period of space shooting", *Advanced Information Systems*, Vol 2, No. 2, pp. 110–116, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.19>
2. Andreev S.M. & Nechausov A.S. (2018), "Algorithm of automated assignment to the class of atmospheric stability for flow meteorological conditions", *CSNC*, No. 2 (48), pp. 105–110, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.2.105>
3. Berlyant A.M., Vostokova A.V., Kravtsova V.I.. Cartography / edited by A.M. Berlyant. M.: Aspect Press, 2003. 477 p.
4. Voronina L.V. Ecological aspect of dangerous weather phenomena // *Iiterexpo*. 2010. Vol.4. Part 2. pp. 75-79.
5. Scientific Research Center of space hydrometeorology "Planet". URL: <http://planet.rssi.ru/index1.html>.
6. Nevidimova O.G., Yankovich E.P. The use of GIS technologies in the regional analysis of natura. 1. and climatic hazards // *Mining information and analytical Bulletin*. 2009. Vol.17. No.12. C. 305-309.
7. Panfutova Y.A. Dangerous meteorological phenomena on the flat territory of Russia and the risks created by them: abstract of the dissertation of the Candidate of Geographical Sciences. SPb., 2008. 21 p.
8. Pyankov S.V., Shikhov A.N. Dangerous hydrometeorological phenomena: regime, monitoring, forecast / Perm. state University. Perm: Publishing house of LLC "Rarity-Perm", 2014. 296 p.
9. Lagutin A.A., Lagutin Al.A., Shmakov I.A., Nikulin Yu.A. Specialized GIS of operational monitoring of the environment of the territory and forecasting of sources of natural emergencies// *Computing Technologies*, 2007, issue 3, vol. 12, pp. 54-64.
10. Butenko, O.; Horelik, S.; Krasovska, I.; Zakharchuk, Ye. Complex space monitoring data analysis to determine environmental trends of Poland-Ukraine border areas. *Architecture Civil Engineering Environment*, 2020.
11. Danshyna S. Yu., Nechausov A. S. Solution of the problem of placing medical facilities in city development projects. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. No 3(54) 2020 – P. 138-149. DOI 10.15588/1607-3274-2020-3-13.
12. Salishchev K.A. Cartography. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1990. 400 p.
13. Svatkova T.G. Atlas cartography. M.: Aspect Press, 2002. 203 p.

14. EM-DAT – The Int. Disaster Database, Centre for Research on the Epid. of Disasters - CRED. URL: <http://www.emdat.be>.
15. European Environment Agency. [Electronic resource] URL: <http://www.eea.europa.eu>.
16. European Severe Weather Database. [Electronic resource] URL: <http://essl.org/cgi-bin/eswd/eswd.cgi>.
17. Butenko, Olga; Horelik, Stanislav; Zynyuk, Oleh Geospatial data processing characteristics for environmental monitoring tasks. *Architecture Civil Engineering Environment*, 2020.
18. Gilles André Natural hazard mapping across the world. A comparative study between a social approach and an economic approach to vulnerability *Environment, Nature, Paysage*, 2012. URL: <http://cybergegeo.revues.org/25297>.
19. Interior Geospatial Emergency Management System (IGEMS). URL: <http://igems.doi.gov>.
20. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe an overview of the last decade, EEA, Copenhagen, 2010 Environmental issue report No. 13/2010. 146 p.
21. Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe, EEA, Copenhagen, 2003 Environmental issue report No. 35.54 p.
22. Maps: US Natural Disaster Risk, Population Density and Nuclear Facilities. URL: <http://www.crisishq.com/why-prepare/us-natural-disaster-map>.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев С. М., Жилін В. А., Вологовська Д.О. Розробка методики визначення типів хмарності для замовлення оптимального часового періоду космічної зйомки. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Том 2, № 2. С. 110–116. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.19>.
2. Андреев С. М., Нецаусов А.С. Алгоритм автоматизованого визначення класу стабільності атмосфери для поточних метеоумов. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2018. – Т. 2 (48). – С. 105-110. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.2.105>.
3. Берлянт А.М., Востокова А.В., Кравцова В.И. и др. Картоведение. Москва: Аспект Пресс, 2003. 477 с.
4. Воронина Л.В. Экологический аспект опасных погодных явлений. Итерэкспо. 2010. Т.4. Ч.2. С. 75– 79.
5. Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета». URL: <http://planet.rssi.ru/index1.html>.
6. Невидимова О.Г., Янкович Е.П. Использование ГИС-технологий в региональном анализе природно-климатических опасностей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. Т.17. №12. С. 305–309.
7. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь, 2014. 296 с.
8. Лагутин А.А., Шмаков И.А., Никулин Ю.А. Специализированная ГИС опер. мониторинга окружающей среды территории и прогнозирования источников природных ЧС. *Вычислительные технологии*. 2007. Вып. 3, т. 12. С. 54-64.
9. Butenko O., Horelik S., Krasovska I., Zakharchuk, Y. Complex space monitoring data analysis to determine environmental trends of Poland-Ukraine border areas. *Architecture Civil Engineering Environment*, 2020. DOI: [10.21307/ACEE-2020-016](https://doi.org/10.21307/ACEE-2020-016)
10. Danshyna S. Yu., Nechausov A. S. Solution of the problem of placing medical facilities in city development projects. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. No 3(54) 2020. P. 138-149. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-13>
11. Салищев К.А. Картоведение. Москва: МГУ, 1990. 400 с.
12. Сваткова Т.Г. Атласная картография. Москва: Аспект Пресс, 2002. 203 с.
13. EM-DAT – The Int. Disaster Database, Centre for Research on the Epid. of Disasters – CRED. URL: <http://www.emdat.be>.
14. European Environment Agency. URL: <http://www.eea.europa.eu>.
15. European Severe Weather Database. URL: <http://essl.org/cgi-bin/eswd/eswd.cgi>.
16. Butenko, O., Horelik, S., Zynyuk, O. Geospatial data processing characteristics for environmental monitoring tasks. *Architecture Civil Engineering Environment*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21307/ACEE-2020-008>
17. Gilles André Natural hazard mapping across the world. A comparative study between a social approach and an economic approach to vulnerability. *Environment, Nature, Paysage*, 2012. URL: <http://cybergegeo.revues.org/25297>.
18. Interior Geospatial Emergency Management System (IGEMS). URL: <http://igems.doi.gov>.
19. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe An overview of the last decade, EEA, Copenhagen, 2010 Environmental issue report №13/2010. 146 p.
20. Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe, EEA, Copenhagen, 2003 Environmental issue report №35. 54 p.
21. Maps: US Natural Disaster Risk, Population Density and Nuclear Facilities. [Электронный ресурс] URL: <http://www.crisishq.com/why-prepare/us-natural-disaster-map>.

Received (Надійшла) 01.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 05.01.2022

**Application of geoinformation technologies for construction of mapping models of hazardous meteorological phenomena**

S. Andreev, S. Horelyk, A. Nechausov, D. Saul-Hoze

**Abstract.** The subject of the research is the development of the structure of the regional GIS for monitoring dangerous meteorological phenomena and the construction of cartographic models of hazardous meteorological phenomena using Earth remote sensing data and other spatial and nonspatial data. The object of the research is the methods of using geoinformation technologies for constructing cartographic models of dangerous meteorological phenomena. The aim of the work is to increase the efficiency of visualization of data on dangerous meteorological phenomena to support managerial decisions to mitigate and neutralize the effects of adverse climatic conditions and their impact on society. **Conclusions:** The analysis was carried out and the classification of cartographic models of dangerous meteorological phenomena was determined. The structure of the regional GIS for monitoring dangerous meteorological phenomena has been developed. Cartographic models of hazardous meteorological phenomena based on remote sensing data have been developed, which increase the information content of meteorological data to support the adoption of managerial decisions on responding to unfavorable climatic processes and their consequences. Maps of dangerous meteorological phenomena have been constructed using the example of hurricane Irma based on remote sensing data.

**Keywords:** dangerous meteorological phenomena (DME), cartographic model, climatic changes, remote sensing data.

О. І. Бандурка, О. В. Свинчук

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

**Анотація.** Космічні методи стеження за лісовими пожежами допомагають виявляти їх на початковій стадії і забезпечують оперативне прийняття рішень, що сприяє подальшому здійсненню моніторингу та оцінюванню наслідків. Використання космічних даних для моніторингу пожежного стану дозволяє швидко й економічно отримувати об'єктивну і незалежну інформацію, щоб оперативно приймати рішення для боротьби зі стихією. У роботі розроблений метод ідентифікації пожеж з використанням космічних знімків низької роздільної здатності одержаних з супутників TERRA MODIS та NOAA AVHRR. Одним з проблемних аспектів у методі визначення пожеж є маскування хмар та води. Тому для ідентифікації «пожежних» пікселів важливо виключати з аналізу фрагменти знімків, які покриті хмарами та зайняті водними об'єктами. Алгоритм вимагає значного збільшення випромінювання в діапазоні 4 мк, а також відносного спостережуваного випромінювання в діапазоні 11 мк. Алгоритм досліджує кожен піксель сцени, якому в результаті присвоюється один з наступних класів: відсутні дані, хмара, вода, потенційно пожежні або невизначені. Пікселі хмар та водних об'єктів, що визначаються за допомогою методики маскування хмар і водних об'єктів, належать до класів хмар та води відповідно. Алгоритмом виявлення пожежі досліджуються лише ті пікселі земної поверхні, які віднесені до потенційно пожежних або невизначених. Метод був реалізований за допомогою інструменту візуального програмування Power Builder в середовищі системи обробки даних дистанційного зондування Землі Erdas Imaging. У результаті використання методу ідентифікації були виявлені пожежонебезпечні місця в Чорнобильській зоні відчуження. Використання методу супутникової ідентифікації пожеж має важливе значення для оперативного виявлення пожеж для віддалених лісових масивів, які слабо контролюються наземними методами моніторингу.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, геоінформаційні системи космічні знімки, ідентифікація пожеж, «пожежний» піксель.

### Вступ

Пожежі є небезпечним явищем природного або техногенного характеру, які здатні неодноразово повторюватись на певній території. Їх відносять до екзогенних локально-катастрофічних чинників, що знищують природні біогеоценози (вигорання сотень тисяч гектарів лісу, тисячі тон сажі та золи, канцерогенні сполуки, що надходять до атмосфери). Найбільш складними і небезпечними є лісові пожежі, які призводять до катастрофічних наслідків в навколишньому природному середовищі. Збільшення кількості й масштабів таких пожеж пов'язане з процесами глобального потепління, що має негативні наслідки для всієї планети. Особливо гостро ця проблема стоїть і в Україні. Щорічно на території країни фіксуються сотні лісових пожеж, внаслідок яких втрачається безцінний заповідний фонд, зникають ендемічні породи дерев, відбувається винищення біоти. Проблема пожеж останніми роками привертає до себе особливу увагу в контексті зростання впливу таких глобальних процесів, як зменшення площ лісів світу, втрата біорізноманіття, глобальні зміни клімату та зміни в землекористуванні. Це пов'язано з комплексністю й неоднозначністю впливу пожеж на ліси, довкілля та громади, що живуть біля лісів. Визначення площі лісу, де пройшла пожежа, є важливою складовою інформаційного забезпечення лісового господарства.

Україна має певний досвід оцінки таких пожеж. Розвиток технічних засобів, висока періодичність, оперативність і доступність матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяють реалізувати задачі без застосування дорогих професійних апаратно-програмних комплексів, зокрема, для отримання

інформації про лісові екосистеми. Одним із способів розв'язання технічної задачі збору і оцінки інформації про лісові пожежі є дистанційне зондування Землі. Це спричинило активне застосування даних методів для отримання інформації про пожежі для вирішення згаданих задач в Україні. Постійний розвиток технічних засобів, висока періодичність надходження інформації, оперативність і доступність матеріалів ДЗЗ дозволяють продовжувати дослідження в цьому напрямку й вирішувати цікаві наукові задачі.

**Постановка завдання.** Космічні методи стеження за лісовими пожежами допомагають виявляти їх на початковій стадії і забезпечують оперативне прийняття рішень, що сприяє подальшому здійсненню моніторингу та оцінці наслідків. Використання космічних даних для моніторингу пожежного стану дозволяє швидко й економічно отримувати об'єктивну і незалежну інформацію, щоб оперативно приймати рішення для боротьби зі стихією. Використання космічних знімків дає можливість не тільки виявляти пожежі на деяких територіях, а й проводити їх первинну класифікацію за площею згорання, а використання багатоспектральних даних у різному поєднанні каналів знімання для спостереження за димовими полями забруднення, оцінювання області розповсюдження продуктів горіння.

Є два головних джерела даних про пожежну активність, які характеризуються специфічними підходами: активні вогнища горіння і пошкоджені пожежами площі територій. Проте підхід до детектування вогнищ характеризується певною кількістю обмежень і не може бути використаний для оцінювання просторового охоплення пошкоджених вогнем територій, зокрема через те, що в момент активного

горіння супутник часто не перебуває у точці, необхідній для детектування, або вона закрита від нього через хмарність. Тому виникає потреба в даних про пошкоджені пожежами території.

Несвоєчасне виявлення лісових пожеж призводить до серйозних наслідків у порушенні природного балансу екосистем. У зв'язку з цим моніторинг потенційно небезпечних ділянок полегшує завдання локалізації та гасіння пожеж на ранніх стадіях. На сучасному етапі досить перспективними є системи дистанційного моніторингу лісових пожеж. Інформація про стан земної поверхні, яка одержується з супутників щодня, широко використовується для оперативного моніторингу природних пожеж. При цьому можливості сучасних ГІС-технологій дозволяють об'єднати з космічними даними велику кількість іншої супутньої інформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Детальний аналіз останніх досліджень і результатів досліджень вказує на те, що задача визначення пошкоджених пожежами територій за даними ДЗЗ має багато альтернативних методів розв'язання.

Особливий вклад в дану галузь зроблений вітчизняними та зарубіжними вченими, серед яких варто відмітити роботи Чандри А.М., Журавльової І.І., Крипука С.Г., Вишнякова В.Ю., Ткачука П.А., Токара О.П., Griffiths P. та ін. [1-6]. Інтелектуальна система прогнозування лісових пожеж, принципи побудови системи та концепція її архітектури розглянута в роботі Берестенькової М.В. [7]. Методика розрахунку параметрів лісових пожеж як динамічних процесів на поверхні Землі з використанням даних космічного моніторингу розглянуті в роботах Коморевського В.С. та Доррера Г.А. [8]. Цікаві технічні рішення методом перерозподілу пропускну здатності на основі удосконаленої розширеної on/off моделі трафіку даних на вході критичної ділянки бездротової мережі передачі даних розглянуто в [9-10]. Також існує багато онлайн-сервісів моніторингу пожеж за даними дистанційного зондування, таких як FIRMS [2].

Для моніторингу територій, вражених пожежами на даний час використовують наступні супутникові системи:

1. Супутники Terra з встановленими спектр радіометрами MODIS;
2. Супутники LANDSAT/ETM+;
3. Супутники NOAA/AVHRR.

Кожну супутникову систему доцільно використовувати для різних цілей. LANDSAT успішно застосовується для виявлення і контролю лісових пожеж, для виявлення впливу на лісові насадження шквалистих вітрів. NOAA і Terra має велике значення у виявленні осередків шкідливих організмів [3-4].

Об'єктивна і своєчасна інформація про наслідки пожеж необхідна для вирішення широкого класу прикладних завдань лісового господарства, включаючи планування охорони і захисту лісів, лісокористування та лісовідновлення, актуалізацію даних про лісові ресурси [11]. Дані про ступінь пошкодження лісів пожежами є невід'ємною складовою інформаційного забезпечення оцінок обсягів прямих і вторинних пірогенних емісій вуглекислого та інших газів

парникового ефекту в атмосферу, виконуваних в рамках зобов'язань країн за умовами Кіотського протоколу, а також наукових досліджень з проблем глобальних змін клімату і біосфери [1].

Останнім часом все частіше застосовуються супутникові зображення, що дозволяють суттєво підвищити повноту виявлення та точність визначення площі насаджень, що усихають, які становлять пожежонебезпеку, особливо в літній період, а також більш ефективно організувати наземну оцінку кількісних характеристик їх стану [12].

Можливість використання супутникових даних для оцінки ступеня пошкодження лісів пожежами відзначалася багатьма дослідниками. Результати досліджень, зокрема, продемонстрували наявність кореляції між показниками ступеня пошкодження і значеннями коефіцієнта відображення в середньому інфрачервоному каналі, нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI і ряду інших вегетаційних індексів [13], одержуваних на основі супутникових зображень. Була відзначена також доцільність комбінованого використання різночасових супутникових даних, отриманих до і після пожежі [14]. При цьому більшість досліджень до теперішнього часу носило локальний характер, виконуючись на невеликих територіях, часто обмежених окремими пожежами.

Сучасні автоматичні технології супутникового моніторингу забезпечують фактично безперервне виявлення та оцінку площі ушкодження лісів пожежами на основі комплексного використання даних MODIS і Landsat-TM / ETM+ [16]. Застосування супутникових систем стало можливим завдяки використанню апаратів, що вловлюють світлові промені різних спектрів, у тому числі інфрачервоних [17].

Аерокосмічний моніторинг дозволяє отримувати найсвіжішу інформацію, що є важливою для проведення ситуаційного аналізу з метою вироблення оптимального рішення. Ці дані є основою для створення актуальних топографічних і тематичних карт, і, насправді, є первинним джерелом всієї сучасної картографічної інформації. Більш того, сучасні технології аерокосмічного моніторингу, дистанційного зондування та комп'ютерної обробки ДДЗ істотно перевершують можливості традиційних паперових карт як щодо змісту, так і щодо різноманітності методів візуалізації. За оцінками експертів, в найближчому майбутньому ДЗЗ стануть основним джерелом інформації для ГІС, в той час як традиційні карти будуть використовуватися тільки на початковому етапі в якості джерела статичної інформації (рельєф, гідрографія, основні дороги, населені пункти, адміністративний поділ). Можна також додати, що практично весь комп'ютерний географічний аналіз виконується з поданням даних в растровій формі, яка властива ДЗЗ [3].

У даному дослідженні використовувались космічні знімки NOAA-AVHRR, які є затребуваними національними пожежними службами багатьох країн (США, Канада, Бразилія) і вже довгий час використовуються для ідентифікації пожеж та оцінки їх наслідків. Незважаючи на те, що роздільна здатність

цих знімків відносно невелика – 1100 м, слідування за зміною теплового випромінювання від пікселя дозволяє ідентифікувати навіть лісові пожежі невеликої площі (від 3 га) та точкові джерела вогню високої температури. Використання досвіду Інституту природних ресурсів Великобританії та наукових центрів Польщі, Чилі, Нікарагуа, Намібії тощо [17], показало можливість розробки та застосування аналогічних методів. Тому, на сьогоднішній день актуальним науковим завданням є розробка методу оперативного виявлення пожеж на відносно невеликій території.

**Метою дослідження** є розробка методу ідентифікації пожежонебезпечних ділянок з використанням космічних знімків низької роздільної здатності на основі маскування хмар та водних об'єктів.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо існуючі методи виявлення пожеж з використанням космічних знімків низької роздільної здатності. Для визначення потенційно «пожежних» пікселів (PF) існує ряд алгоритмів. Вони базуються на оцінках яскравісної температури в спектральних діапазонах від 3.5-4 до 10.5-11.5 мк. Дані алгоритми поділяють на дві групи – порогові і просторові. Порогові алгоритми чутливі до умов конкретної місцевості, пори року, часу доби, типу рослинності, температури ґрунту, а просторові базуються на порівнянні яскравісної температури потенційно «пожежного» пікселя з яскравісною температурою вільних від хмар оточуючих пікселів. Просторовий алгоритм враховує просторову зміну теплового фону, на відміну від одноканального або багатоканального алгоритму порогового розділення.

Одним з проблемних аспектів при визначенні місця пожежі за допомогою космічних знімків низької роздільної здатності є маскування хмари та води. Тому для ідентифікації пожежних пікселів під час дешифрування важливо виключити фрагменти зображення, які покриті хмарами та зайняті водними об'єктами.

Розділимо методи аналізу на три критерії для:

- денного часу – пікселі вважаються затемненими, якщо виконується одна з умов:

$$\rho_{0.65} + \rho_{0.85} > 0.9, T_{12} < 265K, \quad (1)$$

$$\rho_{0.65} + \rho_{0.85} > 0.7, T_{12} < 285K, \quad (2)$$

де  $T_{12}$  – яскравісна температура в спектральному діапазоні 11-12 мк,  $\rho_{0.65}$  та  $\rho_{0.85}$  – коефіцієнти відбиття, К – температура по Кельвіну;

- нічного часу – пікселі позначають хмари, якщо задовольняється умова

$$T_{12} < 265K. \quad (3)$$

Встановлено, що ці критерії будуть достатніми лише для ідентифікації більших прохолодних хмар, але не враховують невеликі хмари та їх краї.

**Алгоритм виявлення «пожежних» пікселів для знімків TERRA MODIS.** Основою алгоритму виявлення «пожежних» пікселів є ідентифікація пікселів, в яких спостерігається одночасне активне горіння одного або декількох вогнищ пожеж у момент

проходження супутника над земною поверхнею. Аналогічно до більшості інших супутникових алгоритмів виявлення пожежі, даний підхід використовує випромінювання середньо-інфрачервоного та довгохвильового інфрачервоного діапазонів на знімку, що містить «гарячі» субпіксельні об'єкти. Алгоритм вимагає значного збільшення випромінювання в діапазоні 4 мк, а також відносного спостережуваного випромінювання в діапазоні 11 мк. Ця характерна ознака пожежі визначається значною різницею яскравісної температури абсолютно чорного тіла в спектральних діапазонах 4 мк та 11 мк, що виділяється при горінні.

Алгоритм досліджує кожен піксель сцени MODIS, якому в результаті присвоюється один з наступних класів: відсутні дані, хмара, вода, потенційно пожежні або невизначені. Пікселі, в яких відсутні фактичні дані, класифікуються як «відсутні дані» (NULL) та виключаються з подальшого розгляду. Пікселі хмар та водних об'єктів, що визначаються за допомогою методики маскування хмар і водних об'єктів, належать до класів хмар та води відповідно. Дана класифікація використовується для усунення ймовірно «непожежних» пікселів, а решта пікселів враховуються в подальших випробуваннях з метою визначення його приналежності до активної вогняної фази.

Денний піксель ідентифікується як потенційний «пожежний» піксель, якщо виконуються умова:

$$\begin{cases} T_4 > 310K, \\ \Delta T > 10K, \Delta T = T_4 - T_{11}, \\ \rho_{0.86} < 0.3, \end{cases} \quad (4)$$

де  $T_4$  – яскравісна температура в спектральному діапазоні 4 мк,  $T_{11}$  – яскравісна температура в спектральному діапазоні 11 мк,  $\rho_{0.86}$  – коефіцієнт відбиття сонячного проміння.

Для нічних пікселів умова відбиття з системи (4) опускається, а  $T_4$  зменшено до 305 К.

Пікселі, що не відповідають умові (4), класифікуються як «непожежні» пікселі.

Існує два логічні підходи, завдяки яким ідентифікуються «пожежні» пікселі:

- перший – представлений абсолютним пороговим тестом, для якого поріг повинен бути встановлений досить високим, щоб виявити лише однозначні «пожежні» пікселі);

- другий – представлений серією розроблених контекстних умов виявлення більшості активних «пожежних» пікселів, які мають найменшу ймовірність.

Абсолютний пороговий тест – ідентичний оригінальному алгоритму [16], для якого виконуються умови:

-  $T_4 > 360K$  – в денний час;

-  $T_4 > 320K$  – в нічний час.

Незважаючи на високий денний поріг, користь цього тесту залежить від кута відбиття сонячних променів над горизонтом, так як може виникати хибний результат, спричинений відблиском певних об'єктів. Нічні пікселі визначаються як такі, що мають кут відбиття сонячних променів більше  $85^\circ$ .

Наступний етапом даного алгоритму є оцінка радіометричного сигналу потенційного «пожежного» пікселя, яка виконується незалежно від результату абсолютного порогового тесту, та використовує сусідні пікселі. За фонові значення у вікні приймаються дійсні сусідні пікселі, де центральним є піксель, що ідентифікується як потенційно «пожежний». У цьому вікні дійсними вважаються пікселі, які відповідають наступним вимогам: містять корисні спостереження; розташовані на суші; не містять хмари; не є фоновими «пожежними» пікселями.

«Пожежними» ідентифікуються ті пікселі, для яких виконуються умови (4) і (5) при денному та нічному спостереженні відповідно:

$$T_4 > 325K, \Delta T > 20K, \quad (5)$$

$$T_4 > 310K, \Delta T > 10K. \quad (6)$$

Важливим фактором даного алгоритму є розмір вікна. Емпірично доцільним є розмір 21×21 пікселя, при цьому дійсними повинні бути не менше 8 пікселів. Кількість дійсних пікселів у фоновому вікні позначається  $N_v$ . Під час процесу аналізу, визначається кількість відхилених сусідніх пікселів  $N_f$ , а також кількість сусідніх пікселів, виключених як вода  $N_w$ . Якщо ідентифікована достатня кількість дійсних сусідніх пікселів, виконується обчислення кількох статистичних показників:

- $\overline{T_4}, \sigma_4$  – середнє та середнє абсолютне відхилення  $T_4$  для дійсних сусідніх пікселів;
- $\overline{T_{11}}, \sigma_{11}$  – середнє та середнє абсолютне відхилення  $T_{11}$  для дійсних сусідніх пікселів;
- $\overline{\Delta T}, \sigma_{\Delta T}$  – середнє та середнє абсолютне відхилення  $\Delta T$  для дійсних сусідніх пікселів.

Для просторового алгоритму виявлення пожеж як міри дисперсії використовується середнє абсолютне відхилення, а не стандартне відхилення, оскільки воно більш стійке до відхилень.

Це досить принципово, оскільки присутність невизначених хмар, води, продуктів згорання від пожежі та інших джерел у фоновому вікні є явищем, яке досить часто зустрічається.

**Алгоритм для ідентифікація «пожежних» пікселів з використанням знімків NOAA AVHRR.** Просторовий алгоритм, який ідентифікує потенційно «пожежні» пікселі за знімками NOAA AVHRR, складається з двох послідовних випробувань.

Випробування 1 – піксель визначений як PF, якщо виконується умова:

$$\begin{cases} T^B(3) > 311K, \\ T^B(3) - T^B(4) > 8K, \end{cases} \quad (7)$$

де  $T^B(X)$  – яскравісна температура в каналі X: канал 3 – спектральний діапазон 3-4 мк, канал 4 – спектральний діапазон 10-11 мк.

Випробування 2 – піксель визначений як PF, якщо виконується умова:

$$\begin{cases} T^B(3-4)_{PF} - [T^B(3-4)_b + \delta T^B(3-4)_b] > 0, \\ T^B(3)_{PF} - [T^B(3)_b + \delta T^B(3)_b] > 3K, \end{cases} \quad (8)$$

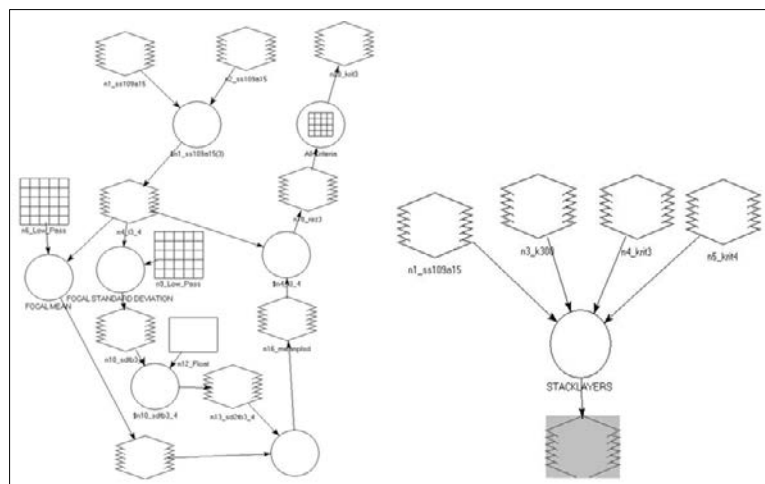
де  $T^B(3)_b$  – середнє значення яскравісної температури фону в каналі 3,  $\delta T^B(3)_b$  – стандартне відхилення яскравісної температури фону в каналі 3,  $T^B(3-4)_b$  – середнє значення різниці яскравісної температури фону в каналах 3 і 4,  $\delta T^B(3-4)_b$  – стандартне відхилення різниці яскравісної температури фону в каналах 3 і 4.

Відібрані таким чином пікселі можна розділити на три групи: однозначно «пожежні», ймовірно «пожежні» та однозначно «непожежні». Подальше визначення однозначно «пожежних» пікселів виконується маскуванням місць, де PF – однозначно «непожежні» (піщані ґрунти, водойми, техногенні об'єкти, що виділяють велику кількість тепла). Наявність чітко визначених територій з високим ступенем пожежної небезпеки (карти лісових кварталів в лісництвах зони відчуження з визначеними характеристиками стану лісів) дає можливість з високою ймовірністю віднести PF до однозначно «пожежних» пікселів.

**Алгоритм методу ідентифікації пожеж.** Метод був реалізований за допомогою інструменту візуального програмування Power Builder в середовищі системи обробки даних ДЗЗ Erdas Imaging на основі знімків TERRA MODIS та NOAA AVHRR. Алгоритм реалізації даного методу приведений на рис. 1.

Моніторинг пожеж виконується за допомогою послідовності операцій в середовищі системи обробки даних ДЗЗ Erdas. Ці послідовності можна розділити на кілька етапів:

- 1) одержання та приведення до робочого формату космічного знімку;
- 2) ідентифікація PF за критеріями (1)-(3);
- 3) геометрична корекція знімку;
- 4) інтеграція знімка з картографічними даними та інтерпретація результатів.





Станції прийому одержують знімки в HRPT форматі. Спеціалізованою програмою SmartTrack знімок конвертується в проміжний Level 1B формат, а модулем Import Erdas Imagine проміжний файл конвертується в робочий формат системи Erdas Imagine. При імпортуванні виконується радіометрична корекція (калібровка даних). Результатом обробки є фрагмент імпортованого знімка, який охоплює територію Чорнобильської зони відчуження та прилягаючі до неї регіони (рис. 2).

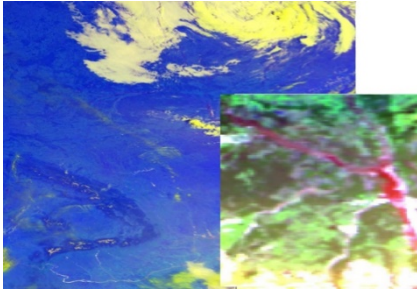


Рис. 2. Одержаний та конвертований космічний знімок Чорнобильської зони відчуження та прилеглих до неї регіонів

Отриманий імпортований знімок надає зручну інформацію про загальну територію Чорнобильської зони завдяки калібровці даних. Знімок подається для подальшої обробки. Для ідентифікації «пожежних» пікселів розроблені моделі (процедури за допомогою пакету Model Maker – модуля Erdas Imagine), що реалізують критерії (1)-(3), а також моделі для маскування (видалення з області аналізу) хмар. Процес виділення «пожежних» пікселів складається з таких етапів:

- 1) відбір пікселів з яскравішою температурою більше 311 K;
- 2) відбір пікселів за різницею температури в 3 і 4 каналі;
- 3) статистична оцінка значення різниці яскравіших температур в 3 та 4 каналі;
- 4) статистична оцінка яскравішої температури в 3 каналі.

Результатом цих етапів будуть знімки, на яких будуть виділені «пожежні» пікселі, які на рис. 3 зафарбовані яскраво-червоним кольором. Рис. 3 показує, що на досліджуваній території є місця, в яких з великою ймовірністю може виникнути пожежа. У результаті ми одержали знімок з ідентифікованими пожежами.

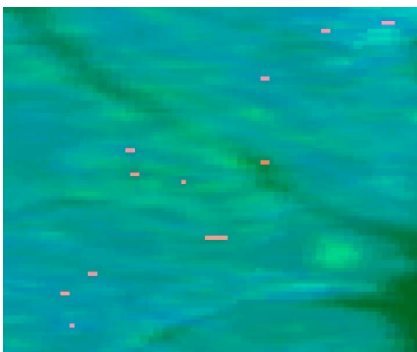


Рис. 3. «Пожежні» пікселі на території Чорнобильської зони відчуження

Після ідентифікації пожеж необхідно визначити точну локалізацію з точністю до лісового кварталу. Для цього знімок повинен бути скорегований (ректифікований) і приведений до картографічної проєкції, в якій знаходяться основні картографічні дані, пов'язані з Чорнобильською зоною відчуження. Цей процес виконується шляхом ідентифікації опорних точок на знімку і співставлення їх з об'єктами на векторній карті. Геометрична корекція виконується методом поліноміального перетворення другого порядку. На рис. 4 зображено досліджувану територію з проведеною геометричною корекцією. Якість корекції видно по суміщенню з векторним шаром водних поверхонь.

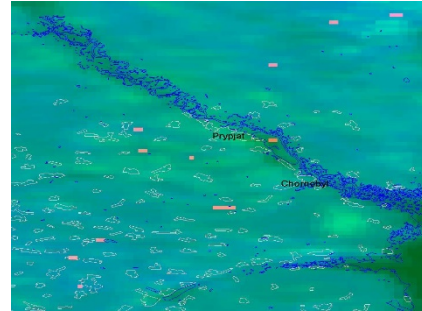


Рис. 4. Ректифікований знімок суміщений з векторним шаром водойм для території Чорнобильської зони

**Отримання інформації на основі обробки даних ДЗЗ.** Протягом травня та червня місяців 2021 року дана методика тестувалась на фрагментах знімків зони відчуження. Складений часовий ряд фрагментів знімків. На основі цієї методики в зоні виявлено кілька постійно «гарячих» об'єктів біля річки Уж та на лісових територіях навколо. Вони конвертовані в векторний шар і враховуються при аналізі. У результаті обробки знімку отримано наочне відображення пожежонебезпечних ділянок досліджуваної території, що дозволяє оперативно зреагувати на надзвичайну ситуацію і прийняти правильні управлінські рішення.

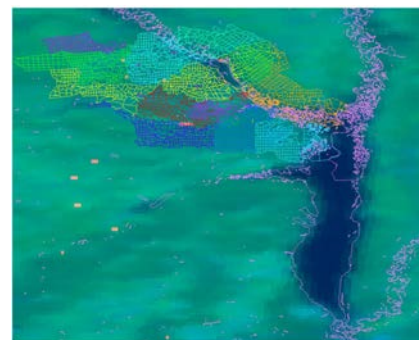


Рис. 5. Ідентифіковані «пожежні» пікселі в районі Чорнобильської зони відчуження та на прилеглих територіях

### Висновки

У роботі розроблені методи ідентифікації пожеж з використанням космічних знімків низької роздільної здатності на прикладі території Чорнобильської зони відчуження та прилеглих. Описано алгоритм виявлення «пожежних» пікселів для знімків TERRA MODIS та NOAA AVHRR. Встановлено, що для

ідентифікації пожежонебезпечних місць важливо при дешифруванні виключити з фрагменти знімків, які покриті хмарами та зайняті водними об'єктами. Практично застосований метод, який базується на комбінації середнього інфрачервоного (3-4 мікрона) з тепловим (10-11 мікрон) космічних знімків, що дозволяє швидко та оперативно визначити пожежі в реальному масштабі часу на субпіксельному рівні. Ідентифікація пікселів, в яких одночасно активно горить одна або кілька пожеж на момент проходження супутника над Землею, є основою алгоритму виявлення «пожежних» пікселів. Алгоритм досліджує кожен піксель сцени, якому в результаті присвоюється один з

наступних класів: відсутні дані, хмара, вода, потенційно пожежні або невизначені. Метод був реалізований за допомогою інструменту візуального програмування PowerBuilder в середовищі системи обробки даних ДЗЗ Erdas Imaging. Оперативне виявлення пожеж дає можливість швидко здійснити гасіння пожеж та збереження лісових ресурсів. Даний метод є універсальним і потребує лише якісних космічних знімків NOAA AVHRR, TERRA MODIS, що є у вільному доступі. Подальшим перспективним шляхом розвитку роботи є застосування експертних систем, які дозволять створити прогнозу модель, надаючи системі більшої гнучкості та універсальності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические инф. системы. М.: Техносфера, 2010. 312 с.
2. Журавлева И. Мониторинг пожаров на природных территориях с помощью сервиса FIRMS. *Географические информационные системы и дистанционное зондирование*. 2010. URL: <http://gis-lab.info/qa/firms.html>.
3. Крицук С.Г. Картирование бореальных лесов по спутниковым данным. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9, № 4. С. 255–264.
4. Вишняков В.Ю., Ткачук А. Особенности методов выявления температурных аномалий за данными ДЗЗ MODIS (TERRA) та AVHRR (NOAA). Оцінки їх якості. *Екологічна безпека та природокористування*. 2012. № 10. С. 81–90.
5. Griffiths P. et al. Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 151. P. 72–88.
6. Токар О., Король М., Гаврилюк С., Цуняк А. Використання супутникових знімків для оцінювання таксаційних показників лісових насаджень. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2017. № 85. С.84–93.
7. Берестенькова М.В. Интеллектуальная система прогнозирования лесных пожаров. 2012. Т. 30, № 5. С.64–67.
8. Коморовский В.С., Доррер Г.А. Методика расчёта параметров лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли с использованием данных космического мониторинга. *Вестник СГАУ*. 2015. С. 47–50.
9. Kuchuk N. Mozhaev O., Kuchuk N., Mozhaev M. Multiservice network security metric. 2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT). 2017. P.133–136.
10. Стругайло В.В. Обзор методов фильтрации цифровых изображений. *Наука и образование*. 2012. № 5. С. 1–12.
11. Зацерковний В.І., Тішаєв І.В., Шищенко О.І. Застосування матеріалів дистанційного зондування в завданнях моніторингу лісових пожеж і кількісного оцінювання рослинності. *Наукоємні технології*. 2016. №1. С. 42–47.
12. Миронюк В.В., Георгіян М.І. Застосування стратифікованої вибірки для регіональної оцінки площі лісів України за даними глобальних карт лісового покриву. *Збалансоване природокористування*. 2017. № 1. С. 69–74.
13. Бардиш Б., Бурштинська Х. Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2015. № 2 (28). С. 82–88.
14. Білинський Й.Й., Книш Б.П., Кулик Я.А. Обробка та використання мультиспектральних зображень моніторингу. *Наукові праці ВНТУ*. 2020. №4. С. 1–11.
15. Morissette J. Giglio L., Csiszar I., Setzer A. Validation of the MODIS active fire detection products derived from two algorithms. *Earth Interactions*. 2015. Vol. 9. P. 1–29.
16. Matson M. Dozier J. Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2016. № 47. P. 1311–1318.
17. Seielstad C., Riddering J., Brown S., Queen L., Hao W. Testing the sensitivity of a MODIS-like daytime active fire detection model in Alaska using NOAA/AVHRR infrared data. *PhERS*. 2016. № 68. P. 831–838.

Received (Надійшла) 22.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

**Method of identification of space images for forecasting forest fires**

O. Bandurka, O. Svynchuk

**Abstract.** Space forest fire monitoring methods help to detect them at an early stage and provide prompt decision-making, which facilitates further monitoring and evaluation of the consequences. The use of space data to monitor fire conditions allows you to quickly and economically obtain objective and independent information to make quick decisions to deal with the elements. The method of fire identification using low-resolution space images obtained from TERRA MODIS and NOAA AVHRR satellites is developed in the work. One of the problematic aspects in the method of determining fires is the masking of clouds and water. Therefore, in order to identify "fire" pixels, it is important to exclude from the analysis fragments of images that are covered with clouds and occupied by water bodies. The algorithm requires a significant increase in radiation in the range of 4 microns, as well as the relative observed radiation in the range of 11 microns. The algorithm examines each pixel of the scene, which as a result is assigned one of the following classes: missing data, cloud, water, potentially fire or undefined. Pixels of clouds and water bodies, determined by the technique of masking clouds and water bodies, belong to the classes of clouds and water, respectively. The fire detection algorithm examines only those pixels of the earth's surface that are classified as potentially fire or undefined. The method was implemented using the Power Builder visual programming tool in the Erdas Imaging remote sensing system. As a result of using the identification method, fire-hazardous places in the Chernobyl Exclusion Zone were identified. The use of satellite fire identification is important for the rapid detection of fires in remote forests that are poorly controlled by terrestrial monitoring methods.

**Keywords:** remote sensing of the Earth, geographic information systems, space images, fire identification, "fire" pixel.

Д. А. Гапон, М. А. Денисенко, А. О. Зуєв, В. М. Лещенко, Д. О. Лунін

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

## СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ СУШІННЯМ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КВАДРАТИЧНОГО ФУНКЦІОНАЛУ

**Анотація** Розглянуто систему оптимального управління процесом сушіння капілярно-пористих матеріалів. **Метою** статті є розробка математичних засад удосконалення системи управління процесом сушіння капілярно-пористих матеріалів. Запропоновано модель сушильної камери періодичної дії, яка є поширеною у народному хазяйстві, в тому числі на невеликих об'єктах. Проведено аналіз існуючих технічних рішень реалізації систем управління сушильним устаткуванням. Розглянуті рішення завдань оптимальної швидкодії та оптимізації за втратами із застосуванням квадратичного функціоналу. За **результатами** дослідження показано, що оптимальне управління для розглянутої моделі складається з трьох інтервалів із розривами в точках перемикання.

**Ключові слова:** процес сушіння, капілярно-пористі матеріали, система управління, квадратичний функціонал, математична модель, оптимізація.

### Вступ

При виготовленні будівельних деталей з капілярно-пористих матеріалів, таких як деревина, цегла, бетон та інші, найбільш енергоємним і тривалим за часом технологічним процесом є їх сушіння. Також від ефективності сушіння залежить якість деталей, що виготовляються. У виробництвах застосовують, як правило, штучне сушіння, що проводиться у спеціальних сушильних установках, до складу яких входять декілька технологічних вузлів. В першу чергу це сушильний апарат, або сушарка, у якій безпосередньо протікає процес, а також допоміжне обладнання – теплообмінні апарати (калорифери), тягодутьовий пристрій (вентилятор, повітродувка) та система пилоочищення. Вони здійснюють, відповідно, нагрівання сушильного агента, пропускання його через сушарку та відокремлення від висушеного продукту. В залежності від особливостей конкретного виробництва створюються різноманітні типи камер із спеціалізованими наборами параметрів, кожен з яких дозволяє досягати певних якостей матеріалу, підвищуючи міцність, пружність, покращуючи зовнішній вигляд та інше.

Таким чином процес сушіння вимагає тривалої підтримки заданих параметрів у певних межах, або навіть їх зміни за певною програмою. Для цього використовуються системи автоматичного управління, які у теперішній час, як правило, будуються з використанням комп'ютерної техніки. Розвиток мікропроцесорів та мікроконтролерів дозволяє використовувати все більш складні алгоритми та обчислення у реальному часі, тому завдання розробки нових підходів побудови оптимальних систем керування для мінімізації витрат енергії і тривалості процесу сушіння є актуальним.

### Огляд існуючих сушильних установок та систем управління ними

Велика кількість праць як вітчизняних так і закордонних вчених присвячена даній тематиці. Згідно

з [1], найбільш прийнятними установками для сушіння капілярно-пористих матеріалів є пароповітряні сушильні камери періодичної дії. Зазвичай ці установки, що застосовуються на підприємствах із невеликими обсягами деревини. Камери, які розроблені в [1] дозволяють більш якісно та гнучко встановлювати режими сушіння з метою досягнення найбільш оптимальних параметрів та фізичних властивостей деревини. За рахунок помірної обсягу пиломатеріалів камери періодичної дії дозволяють досягти найменших показників відсоткового вмісту вологи, тим самим виконавши конкретні вимоги замовника. Обробляється в таких камерах переважно деревина для столярних робіт, виготовлення меблів та різних предметів побуту. Але в цій роботі не розглядається задача оптимального управління такими камерами. В [2] показано метод, завдяки якому досягається ефективне сушіння та мінімальний вміст вологи, а сам пиломатеріал набуває додаткових фізичних властивостей і стає більш стійким до гниття та подальшого руйнування. В цей же час показана формула не дозволяє оптимізувати витрату теплоносія. В роботі [3] показана оптимізація процесу управління в тому числі в камерах періодичної дії, але головним недоліком є відсутність вибору оптимального режиму. У роботах [4,5] переважно, розглядається завдання оптимальної швидкодії без урахування витрат енергії на пропарку матеріалів. При сушінні матеріалів у таких камерах можна виділити три основні етапи - прогрів або пропарювання матеріалу, етап постійної швидкості сушіння та етап з падаючою швидкістю сушіння. Перший етап є допоміжним, але його тривалість може становити кілька діб. Тому саме на цьому етапі є необхідність здійснювати управління, яке було б оптимальне за співвідношенням енерговитрат і тривалості процесу.

**Метою** статті є розробка оптимального управління процесом пропарювання при сушінні капілярно-пористих матеріалів у сушильних камерах періодичної дії для різних критеріїв оптимальності та їхньої технічної реалізації.

### Математична модель сушильної камери

Математична модель сушильної камери періодичної дії може характеризуватися як нелінійна динамічна система з розподіленими параметрами і взаємозалежними управляючими впливами. Такі системи в динаміці описуються нелінійними диференціальними рівняннями у приватних похідних, що ускладнює вирішення задач оптимізації перехідних процесів та збільшує складність реалізації оптимальних регуляторів. У той же час, при інтенсивній циркуляції агентів сушіння нерівномірність розподілу температурного поля може бути значно знижена, а поблизу робочого режиму статичні характеристики сушильної камери можна лінеаризувати, в тому числі за допомогою формули Тейлора.

Все це дозволяє з достатньою точністю описати динаміку сушильної камери лінійним диференціальним рівнянням із постійними коефіцієнтами. 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 [4] була запропонована структурна схема, що складається з восьми ланок (рис. 1).

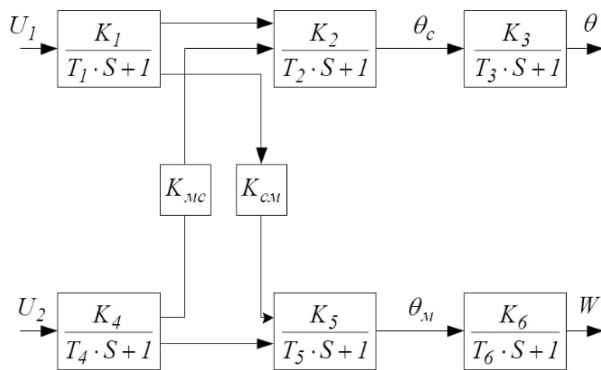


Рис. 1. Структурна схема об'єкта управління

При обмеженні положень засувки величини  $U_1$  та  $U_2$  також обмежені. Ці обмеження можна записати у вигляді

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

Для визначення рівняння динаміки одержаної структурної схеми прирівнюємо зображення за Лапласом температур «сухого» термометра

$$\theta_c(s) = \frac{k_1 k_2 U_1(s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} + \frac{k_2 k_4 k_{mc} U_2(s)}{(T_2 s + 1)(T_4 s + 1)}, \quad (2)$$

та «мокрого» термометра

$$\theta_m(s) = \frac{k_4 k_5 U_2(s)}{(T_4 s + 1)(T_5 s + 1)} - \frac{k_1 k_5 k_{cm} U_1(s)}{(T_1 s + 1)(T_5 s + 1)}. \quad (3)$$

Тоді з виразів (2) та (3) отримаємо

$$U_2(s) = U_1(s) \cdot \frac{k'(T_4 s + 1)(T_{22} s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_{21} s + 1)}, \quad (4)$$

де 
$$k' = \frac{k_1(k_2 + k_5 k_{cm})}{k_4(k_5 - k_2 k_{mc})}, \quad (5)$$

$$T_{21} = \frac{k_5 T_2 - k_2 k_{mc} T_5}{k_2 - k_{mc} k_5}, \quad T_{22} = \frac{k_2 T_5 + k_5 k_{cm} T_2}{k_2 + k_{cm} k_5}. \quad (6)$$

Аналогічним чином можна отримати зворотну залежність

$$U_1(s) = U_2(s) \cdot \frac{(T_1 s + 1)(T_{21} s + 1)}{k'(T_4 s + 1)(T_{22} s + 1)}, \quad (7)$$

де вирази (5) та (6) лишаються незмінними.

Таким чином, рівняння динаміки сушильної камери з матеріалом, що висушується, складене щодо задає впливу на вході і температури всередині матеріалу на виході, набуває вигляду:

$$\begin{aligned} & \frac{d^5 \theta}{dt^5} + a_4 \frac{d^4 \theta}{dt^4} + \\ & + a_3 \frac{d^3 \theta}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + a_1 \frac{d\theta}{dt} + \\ & + a_0 \theta = b_2 \frac{d^2 U_1}{dt^2} + b_1 \frac{dU_1}{dt} + b_0 U_1, \end{aligned} \quad (8)$$

де коефіцієнти залежать від постійних часу та легко обчислюються, виходячи з наведених вище виразів. Рівняння динаміки відповідає передавальній функції:

$$\begin{aligned} K(s) &= \frac{\theta(s)}{U_1(s)} = \\ &= \frac{k_c (T_2 s + 1)(T_4 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)(T_{21} s + 1)}, \end{aligned} \quad (9)$$

### Оптимізація процесу пропарювання за різних умов оптимальності

Розглянемо три випадки: оптимізація за швидкістю, оптимізація за втратами та оптимізація за втратами за допомогою квадратичного функціоналу [6, 7]. Завдання оптимізації швидкодії буде виглядати наступним чином: об'єкт з передавальною функцією (9) потрібно перевести з початкового стану:

$$\theta(0) = \theta_0,$$

$$\frac{d^4 \theta}{dt^4}(0) = \frac{d^3 \theta}{dt^3}(0) = \frac{d^2 \theta}{dt^2}(0) = \frac{d\theta}{dt}(0) = 0,$$

у кінцевий стан

$$\theta(T) = \theta_k,$$

$$\frac{d^4 \theta}{dt^4}(T) = \frac{d^3 \theta}{dt^3}(T) = \frac{d^2 \theta}{dt^2}(T) = \frac{d\theta}{dt}(T) = 0,$$

за мінімальний час так, щоб функціонал

$$q = \int_0^T 1 dt$$

набував найменшого значення. При цьому гамільтоніан матиме вигляд:

$$\begin{aligned} H &= -1 + \psi_1 \lambda_1 x_1 + \psi_2 \lambda_2 x_2 + \\ &+ \psi_3 (\lambda_3 x_3 + v_3 U_1) + \psi_4 (\lambda_4 x_4 + v_4 U_1) + \\ &+ \psi_5 (\lambda_5 x_5 + v_5 U_1). \end{aligned} \quad (10)$$

Рівняння парної системи для вектор-функції мають однакову структуру і можуть бути записані у такому вигляді:

$$\frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i} - \lambda_i \psi_i, (i = 1 \div 5). \quad (11)$$

З рівняння (11) випливає, що

$$\psi_i = \psi_{i0} e^{-\lambda_i t}, (i = 1 \div 5), \quad (12)$$

де  $\psi_{i0}$  – початкове значення відповідних компонентів функції  $\vec{\psi}$ . Оскільки всі  $\lambda_i$  – речові числа, то величина у виразі (12) визначається сумою трьох експонент, яка не може перетинати вісь часу більше двох разів. Отже, оптимальне за швидкістю управління відповідно до принципу максимуму не може складатися з більш ніж трьох інтервалів.

На рис. 2 наведено графік зміни оптимального  $U_1$  за  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $\theta_k = 80^\circ\text{C}$ .

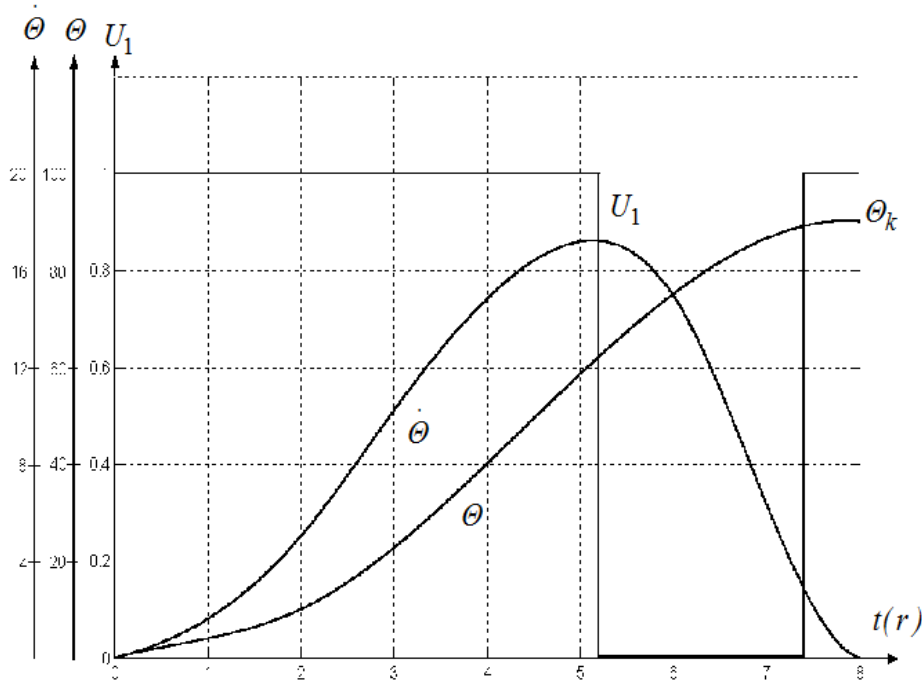


Рис. 2. Оптимальний перехідний процес при обмеженому управлінні та  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $\theta_k = 80^\circ\text{C}$

Завдання оптимальної витрати палива ставить-ся так: об'єкт з передавальною функцією (9) потрібно перевести з початкового стану

$$\theta(0) = \theta_0,$$

$$\frac{d^4\theta}{dt^4}(0) = \frac{d^3\theta}{dt^3}(0) = \frac{d^2\theta}{dt^2}(0) = \frac{d\theta}{dt}(0) = 0,$$

у кінцевий стан

$$\theta(T) = \theta_k,$$

$$\frac{d^4\theta}{dt^4}(T) = \frac{d^3\theta}{dt^3}(T) = \frac{d^2\theta}{dt^2}(T) = \frac{d\theta}{dt}(T) = 0,$$

за заданий час  $T$  так, щоб функціонал

$$q = \int_0^T U_1(t) dt$$

набував найменшого значення.

У цьому випадку за аналогією з попереднім завданням управління має бути релейним триінтервальним. Особливих управлінь немає, оскільки проаналізований об'єкт є лінійним [8]. З фізичних міркувань очевидно, що на першому інтервалі

$$U_{1\text{опт}} = U_{1\text{макс}},$$

другому

$$U_{\text{опт}} = 0,$$

а на третьому

$$U_{1\text{опт}} = U_{1\text{макс}}.$$

Але таке ж рішення для цього об'єкта має завдання оптимальної швидкодії. З іншого боку очевидно, що при однакових граничних умовах і однакових параметрах об'єкта та сама керуюча послідовність не може мати різні тривалості інтервалів. Тому для даного об'єкта рішення задачі мінімізації витрати теплоносія збігається з рішенням задачі оптимальної швидкодії.

Для вирішення задачі оптимізації витрати пального слід використовувати наступний квадратичний функціонал:

$$q = \frac{1}{2} \int_0^T U_1^2(t) dt.$$

Ставиться завдання мінімізації енергетичних витрат за збереження необхідної продуктивності роботи сушильної камери. Рівняння динаміки, перетворене до зручного вигляду, виглядає так:

$$\dot{x}_i = \lambda_i x_i + v_i U_1, (i = 1 \div 5), \quad (13)$$

де  $\lambda_i = -\frac{1}{T_i}$ ;  $v_i$  - постійні коефіцієнти, причому

$$v_1 = v_2 = 0.$$

Для вирішення задачі з використанням принципу максимуму Понтрягіна запишемо гамільтоніан:

$$H = -\frac{1}{2}U_1^2 + \psi_1\lambda_1x_1 + \psi_2\lambda_2x_2 + \psi_3(\lambda_3x_3 + v_3U_1) + \psi_4(\lambda_4x_4 + v_4U_1) + \psi_5(\lambda_5x_5 + v_5U_1). \quad (14)$$

Враховуючи додатки, в які входить дія що відшукується, спрощуємо запис (14):

$$H = -\frac{1}{2}U_1^2 + (\psi_3v_3 + \psi_4v_4 + \psi_5v_5)U_1. \quad (15)$$

З умови максимуму функції вздовж оптимальної траєкторії знайдемо:

$$\frac{\partial H}{\partial U_1} = -U_1 + \psi_3v_3 + \psi_4v_4 + \psi_5, \quad (16)$$

$$\text{звідки} \quad U_{1\text{опт}} = \psi_3v_3 + \psi_4v_4 + \psi_5v_5. \quad (17)$$

Зі сполученої системи  $\frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i} = -\lambda_i\psi_i$  визначимо складові функції  $\psi(t)$ :

$$\psi_i = \psi_{i0}e^{-\lambda_i t}. \quad (18)$$

На підставі рівнянь (13), (17), (18), а також того, що координати  $x_1, x_2$  некеровані та змінюються тільки під дією початкових умов, слід подати граничні умови для координат  $x_3, x_4, x_5$  через  $\theta, \theta, \theta$ .

Таким чином, оптимальне управління є безперервною функцією часу. Іноді може виявитися, що функція  $U_{1\text{опт}}$  не задовольняє обмеження.

Тоді загальне рішення оптимального завдання матиме вигляд:

$$U_{1\text{опт}} = U_{1\text{max}}F[\psi_3v_3 + \psi_4v_4 + \psi_5v_5] = F[\alpha], \quad (19)$$

Вирішення задачі при управлінні  $U_{1\text{опт}}$  типу (19) значною мірою ускладнюється, оскільки виникають інтервали управління з різними законами зміни  $U_1(t)$ . Загальне рішення у разі перебуває у результаті стикування диференціальних рівнянь у точках стику інтервалів. Однак на відміну від задачі оптимальної швидкодії, тут навіть при настанні обмеження функція  $U_{1\text{опт}}(t)$  безперервна.

## Висновки

1. Визначення сушильної камери та обрання оптимального управління є найбільш ефективним та практичним інструментом на сьогоднішній день.

2. Проведений аналіз методів оптимізації процесу пропарювання при різних критеріях оптимальності показав, що задача оптимальної швидкодії та задача мінімізації витрати теплоносія має одне й те саме рішення, якщо як функціонал останньої з них приймається інтеграл від керуючого впливу.

3. Оптимальне управління складається з трьох інтервалів із розривами в точках перемикання. Тому розглянутий далі критерій оптимальності як інтеграла від квадрата управління є кращим, оскільки реалізується одноінтервальною безперервною функцією часу, що є значно простішою з точки зору використання у реальній системі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Личатин Б.І., Личатин І.М. Сушильна камера періодичної дії з подвійними поздовжніми стінами для висушування пиломатеріалів //Науковий вісник НЛТУ України. - 2008. №18.3, с. 146-148.
2. Білей П. В., Губер Ю. М., Копинець З. П. Дослідження тривалості процесу сушіння пиломатеріалів понижених товщин багатоступеневими режимами у виробничих умовах//Науковий вісник НЛТУ України. - 2011. №21.1, с. 99-102.
3. Ming Li, Jianqiao Liu, Hongwei Niu and Yan Jiang Flow Analysis and Optimization of the Air channel of Drying Chamber Based on CFD //Journal of Physics Conference Series. 2021,1732 012170. DOI:10.1088/1742-6596/1732/1/012170
4. 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 сушилки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1980. – с. 232-239.
5. Качанов П.А., Рогачёв А.И., Супрунова С.П. Оптимальное управление процессом сушки при ограничении скорости нагрева // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХГУ, 1984. – Вып.10. - №210. – с.16-18.
6. Fadli, B.; Zeglami, D. and Kabbaj, S.. A variant of the quadratic functional equation on semigroups. 2018, vol.37, n.1, pp.45-55. ISSN 0716-0917 DOI:10.4067/S0716-09172018000100045
7. Sandra Pinelas , V.Govindan , K.Tamilvanan, - Square Quadratic Functional Equation, Global Journal of Mathematics Vol.12, No.1, April 02, 2018. DOI:10.13140/RG.2.2.13636.88966
8. Рогачёв А.И., Денисенко Н.А. Энергосберегающее управление процессом пропарки при сушке капиллярно-пористых материалов //Вісник НТУ «ХПІ», збірник наукових праць. Тематич. випуск Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». 2007. - №36. - с.9-15.

Received (Надійшла) 11.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.01.2022

## System of control of drying of capillary-porous materials using quadratic functional

Dmytro Gapon, Denysenko Mykola, Zuev Andrey, Leshchenko Viacheslav, Lunin Denis

**Abstract.** The system of optimal control of the drying process of capillary-porous materials is considered. The research **purpose** is to develop mathematical principles for improving the control system of the drying process of capillary-porous materials. The model of the drying chamber of periodic action which is widespread in a national economy, including on small objects is offered. The analysis of the existing technical decisions of realization of control systems of the drying equipment is carried out. Solutions of problems of optimal speed and optimization for losses with the use of quadratic functional are considered. According to the **results** of the study it is shown that the optimal control for the considered model consists of three intervals with gaps at switching points.

**Keywords:** drying process, capillary-porous materials, control system, quadratic functional, mathematical model, optimization.

М. Й. Заполовський, І. С. Зиков, М. В. Мезенцев, В. І. Носков

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

## ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОПОТЯГА З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Анотація.** Розглянуті питання розроблення оптимізаційної математичної моделі електропотяга з електроприводом постійного струму з послідовним збудженням та її реалізації в пакеті MATLAB з метою побудови системи керування на основі методу принципу максимуму. Проведено огляд літературних джерел на задану тематику та аналіз існуючих підходів до розв'язання задач моделювання складних електромеханічних систем та синтезу систем керування у даній галузі, зокрема систем керування, які забезпечують мінімізацію енергетичних затрат. Побудовані математичні моделі досліджуваних об'єктів керування, проведене моделювання їхнього функціонування в залежності від рівня завантаженості. Отримані аналітичні співвідношення, які можуть бути використані для розробки структури САК електроприводу електропотягу і розрахунку його параметрів при заданому критерію якості. Проведені дослідження оптимізаційної моделі підтверджують її працездатність та її ефективність для розробки систем керування при заданому критерію якості і ступені завантаженості.

**Ключові слова:** оптимізаційна математична модель, електропривід постійного струму, система керування, принцип максимуму, мінімізація енергетичних затрат.

### Вступ

Розвиток промислових центрів, зосередження населення навколо великих міст викликають збільшення потреби в приміських перевезеннях. Тривалий досвід експлуатації показав, що найбільш ефективним і економічним видом транспорту в приміському сполученні є електропотяги, що виконують більш 3/4 усіх пасажирських приміських перевезень. Одним із першочергових завдань, які стоять перед розробниками перспективних систем керування тягових електроприводів – це питання енергозбереження [1]. Основним напрямком вирішення проблеми енергозбереження на електричному транспорті є зменшення втрат у системі керування тяговим електроприводом: двигун-керуючий пристрій. В певній мірі ефективність електропотягів залежить від їх системи керування, бажано оптимальним чином. Процеси у цій системі досить складні. Їх оптимізація потребує глибокого теоретичного вивчення. Найбільш перспективним методом вивчення є моделювання. Як один із засобів моделювання використовується пакет програмного середовища MATLAB. Для розроблення оптимальних систем керування можуть бути використані сучасні методи синтезу. Завдання синтезу системи керування тяговим електроприводом постійного струму є складовою частиною загального завдання створення оптимальної системи керування транспортними засобами, що забезпечує виконання графіка руху у відповідності заданому критерію якості. Останніми роками вирішення цих завдань пропонується виконувати з використанням сучасних комп'ютерних технологій, в основу яких покладено методи математичного моделювання, аналізу і синтезу складних технічних систем. Тому розробка оптимальних систем керування та моделей для їх дослідження є актуальною задачею.

**Постановка задачі і аналіз відомих публікацій.** На сьогоднішній день наряду з частотним способом керування електроприводом змінного струму значна увага приділяється розробкам оптимальних систем керування електроприводів постійного струму [1]. Рішення задачі розроблення оптимальної

системи керування електроприводом постійного струму в першу чергу пов'язане зі створенням нелінійних математичних моделей з врахуванням особливостей використання того чи іншого методу синтезу управління, критеріїв оцінки якості функціонування системи керування, проведенням комплексних досліджень динаміки електромеханічної системи електроприводу. Для рішення завдань оптимального керування присвячено значне число публікацій [1 – 12], де для синтезу використовується математичне моделювання [3, 4], сучасні методи теорії автоматичного керування та оптимізації [8], комп'ютерні технології. В [4] пропонується ряд методів синтезу управління та математичні моделі електроприводу постійного струму, які можуть бути використані при розробці систем керування з урахуванням вибраного критерію оптимальності. Як правило, задовільний результат отримується при синтезі оптимальних систем керування для об'єктів, які описуються системою диференціальних рівнянь не вище третього порядку [1]. Для систем вищих порядків, а також нелінійних моделей, можливо використовувати комбінований метод знаходження управління. Він зводиться до наступного [7]. На першому етапі з використанням спрощеної моделі електроприводу знаходиться загальний вид управління. На другому – задаються закони можливих управління та в процесі дослідження уточнюються їх види та параметри системи керування за допомогою повної математичної моделі.

**Метою роботи** є створення математичної моделі системи оптимального керування електроприводом постійного струму електропотяга за допомогою принципу максимуму з використанням пакета математичного моделювання MATLAB, яка забезпечувала б економію енергетичних витрат.

### Основна частина

За базову модель використана система керування електроприводом на основі введення в коло живлення електродвигунів електропотягу додаткового резистора, величина опору якого може змінюватися дискретно. Для цього використовується спеціальна

система управління, яка забезпечує підключення відповідної ланки додаткового резистора згідно заданого алгоритму. Вхідною інформацією для формування сигналу управління згідно алгоритму є струм навантаження та швидкість руху електропотяга.

Математична модель електропотягу представлена сукупністю моделей електропривода, яка складається з послідовно з'єднаних чотирьох тягових електродвигунів (ТЕД) постійного струму з послідовним збудженням і моделі формування швидкості потяга. Структурна схема електроприводу представлена у виді еквівалентної схеми на рис. 1, де  $U_{\Pi}$  – джерело

постійної напруги;  $E_{Я}$  – електрорушійна сила якоря;  $L_{Я}$ ,  $R_{Я}$  – відповідно величина індуктивності й опору якорного кола;  $L_{B}$ ,  $R_{B}$  – відповідно величина індуктивності й опору кола збудження;  $R_{Д}$  – додатковий резистор;  $R_{Ш}$  – резистор шунта.

Відповідно до структурної схеми (рис. 1), схема моделі у вигляді передавальних функцій приведена на рис. 2, яка легко реалізується за допомогою пакетів моделювання безперервних систем таких, наприклад, як MATLAB.

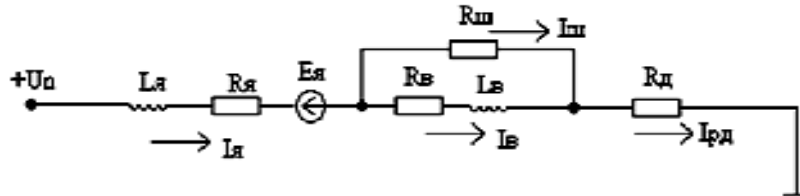


Рис. 1. Еквівалентна схема електроприводу

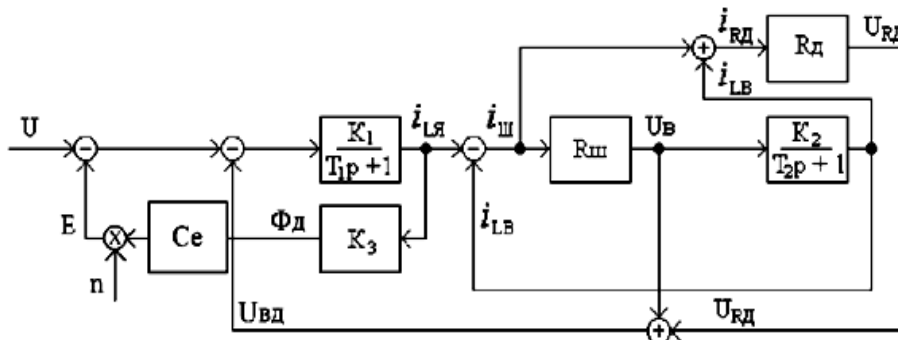


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі ТЕД

Параметри моделі визначаються такими співвідношеннями:

$$K_3 = K' C_E; K_1 = 1 / R_{Я}; T_1 = L_{Я} / R_{Я};$$

$$K_2 = 1 / R_B; T_2 = L_B / R_B.$$

Величина опору шунта розраховується, виходячи з заданого коефіцієнта ослаблення поля ( $\delta\%$ ):

$$R_{Ш} = R_B \cdot \delta\% / (100 - \delta\%).$$

Величина  $R_{Д}$  визначається позицією резистивного контролера. Відповідно до структурної схеми, приведеної на рис. 2, математична модель електропривода може бути представлена рівняннями виду:

$$i_{LЯ} = (U_n - E - U_{ВД}) / (T_1 \cdot p + 1); \quad (1)$$

$$i_{LB} = U_B K_2 / (T_2 p + 1); \quad (2)$$

Крім того:

$$U_{ВД} = U_B + U_{РД}; U_B = R_{Ш} \cdot i_{Ш}; i_{РД} = i_{Ш} + i_{LB};$$

$$U_{РД} = R_{Д} i_{РД}; i_{Ш} = i_{LЯ} - i_{LB}; E = C_E \Phi_D n,$$

де  $C_E$  – постійна величина;  $K'$  – нелінійний коефіцієнт пропорційності кривої намагнічування  $E / n = f(i_{LЯ} W)$ ;  $W$  – число витків обмотки збуд-

ження;  $n$  – обороти двигуна;  $\Phi_D$  – потік двигуна;  $K_H$  – нелінійний коефіцієнт підсилення, обумовлений із кривої намагнічування  $K_H = f(i_{LЯ} W)$ .

У випадку лінійної апроксимації  $K_H$  визначається як:

$$K_H = 1 / C_E (E / n) / (i_{LЯ} W).$$

Конкретні значення  $E / n$  і  $i_{LЯ}$  вибираються з кривої намагнічування.

Оберти двигуна ( $n$ ) можуть бути знайдені з рівняння руху

$$J_{Д} (d\omega_K / dt) = M_{Д} - M_{Н},$$

де  $J_{Д}$  – момент інерції;  $\omega_K$  – кутова швидкість обертання;  $M_{Н}$  – момент навантаження.

Запис в операторній формі рівняння визначення кутової швидкості має вид:

$$\omega_K = (1 / J_{Д}) (M_{Д} - M_{Н}) / p.$$

Тоді:

$$n = (M_{Д} - M_{Н}) / (\tau_{Д} p), \quad (3)$$

де  $\tau_{Д} = J_{Д} 2\pi$ .



Математична модель потяга, що складається з моторного і причіпного вагонів, представляється у вигляді ланок, які описуються передатними функціями. Потяг замінюється еквівалентною масою.

Сила опору руху:

$$F_C = W_0 P_C,$$

де  $W_0$  – питомий опір руху;  $P_C$  – вага потяга.

Момент навантаження, приведений до колісної пари, з урахуванням ухилу шляху, визначається співвідношенням:

$$M_C = 9.8 R m i \left( 1.1 + 0.012 V + 0.000247 V^2 \right) / 1000, \quad (4)$$

де  $i$  – величина ухилу (для горизонтальної площадки  $i = 1$ );  $m$  – маса потяга (кг);  $V$  – швидкість потяга (км/год).

Рівняння руху потяга, при заміні його еквівалентною масою, описується вираженням вигляду:

$$J (d\omega/dt) = M_T - M_C,$$

де  $J$  – момент інерції еквівалентної маси приведеної до колісної пари;  $M_T$  – тяговий момент електроприводу потяга.

Рівняння руху потяга представляється у вигляді ланки інтегруючого типу:

$$\omega = (K_3 / p) (M_T - M_C), \quad (5)$$

де  $K_3 = 1 / J$ ,  $M_T = 4 \mu M_D$ .

Математична модель електропотягу, представлена рівняннями (1)-(5).

Вихідні дані для проведення досліджень приведені в табл. 1.

Таблиця 1.–Вихідні дані

$R_{я}, (Ом)$	$R_{в}, (Ом)$	$C_e$	$C_M$
0,032	0,1194 0,165	300	47,75
$\mu$	$R_{к}, (Ом)$	$L_{я}, (Гн)$	$L_{в}, (Гн)$
3,41 3,47	0,475	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,38 \cdot 10^{-3}$

Структурна схема математичної моделі електропоїзда є основою для розробки моделі об'єкта дослідження, необхідної при визначенні рівнянь відповідно до принципу максимуму. Оскільки шляхом зміни значень додаткового резистора  $R_D$  керування здійснюється до певної швидкості (60 км/год.), а надалі керування розгоном – за рахунок ослаблення поля шляхом зміни значень резистора шунта  $R_{ш}$ , то модель для визначення керувань можемо розглядати як дві математичні моделі: одну до моменту ослаблення поля, а іншу з урахуванням ослаблення поля залишається без змін. Структурна схема моделі до моменту включення дії ослаблення поля наведена на рис. 3, де:  $U_n$  – напруга живлення;  $U_1, U_2$  – по-

точне значення напруг, що залежить від режимів роботи (навантаження) електропривода й значення керуючого впливу  $U_{Rd}$ ;  $i_1$  – струм якорного кола електродвигуна;  $K_1, T_1$  – відповідно коефіцієнти підсилення й постійна часу, що визначаються параметрами електродвигуна;  $R_D$  – додатковий резистор, що формує значення керуючого впливу  $U_{Rd}$ ;  $E_1$  – поточне значення ЕРС електродвигуна;  $n$  – оберти двигуна;  $C_e$  – постійна величина;  $K_2$  – коефіцієнт, обумовлений із кривої намагнічування;  $W$  – число ампервитків.

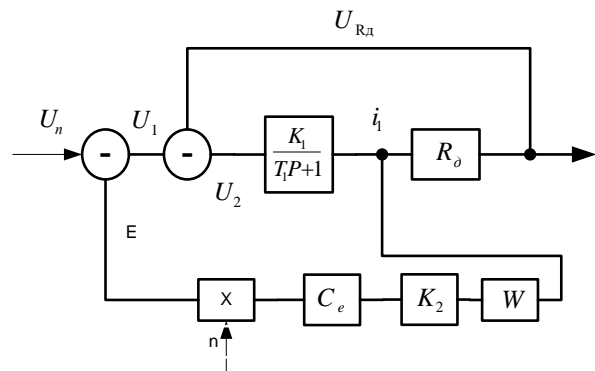


Рис. 3. Структурна схема моделі електропривода без урахування режиму ослаблення поля

В моделі, наведеної на рис. 3, крива намагнічування реалізується на основі лінійної апроксимації. При цьому на кривій намагнічування обрана характерна точка, що відповідає значенню 8000 ампервитків, що відповідає струму якоря, рівному 186 А при  $W = 43$  витка. Відповідно до таких допущень магнітний потік  $\Phi_D$  визначається так:

$$\Phi_D = E/n \cdot \frac{1}{C_e} = i_1 \cdot W \cdot \frac{1}{C_e} \cdot b_1,$$

де  $E/n$  – значення, що визначається із кривої намагнічування.

$$b_1 = 50/8000 = 0,006.$$

За умови, що  $C_e = 300$ ,  $W = 43$ , магнітний потік визначається як:

$$\Phi_D = b_2 \cdot i_1,$$

де  $b_2 = 0,0086$ .

Величина  $E$  визначається відповідно до рівняння:

$$E = C_e n \Phi = C_e n W b_1 \frac{1}{C_e} i_1 = b_3 i_1 n, \quad (6)$$

де  $b_3 = 0,258$ .

Струм  $i_1$ , відповідно до структурної схеми моделі, визначається диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{di_1}{dt} = -\left( \frac{1}{T_1} \cdot i_1 + \frac{1}{L} \cdot (-U_n + E + U_{Rd}) \right), \quad (7)$$

де  $T_I = L/R$  – постійна часу;  $L = 4(L_b + L_{Я})$  – еквівалентна індуктивність кола;  $R = R_b + R_{Я}$  – опір ланок обмоток збудження і якірної.

Для даного типу електропривода  $T = 0,13$  (сек),  $L = 0,019$  (мГн).

Значення  $E$ , що входить у рівняння (7), визначається рівнянням (6), де величина  $n$  (оберти якоря двигуна) є невідомою й у загальному випадку залежать від навантаження.

Для визначення  $n$  використаємо рівняння руху електропоїзда (5). Оскільки керування знаходимо в інтервалі швидкостей від 0 до 60 км/г, то з (4) у вираженні питомого опору руху, обмежимося тільки лінійною частиною, оскільки в цьому діапазоні швидкостей квадратична складова не робить істотного впливу на динаміку процесу.

Оберти якоря двигуна  $n$  знаходимо з рівняння:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2\pi J} (M_T - M_c), \quad (8)$$

де  $J$  – момент інерції електропоїзда, наведений до колісної пари;  $M_T$  – тяговий момент електропоїзда;  $M_c$  – момент опору руху.

З урахуванням лінійної апроксимації величини удільного опору, момент опору  $M_c$  на підставі рівняння (4) визначається рівнянням:

$$M_c = b_4 + b_5 n, \quad (9)$$

де  $b_4, b_5$  – постійні коефіцієнти:

$$b_4 = 1056,4; b_5 = 33,5.$$

Тяговий момент  $M_T$  електропоїзда визначається співвідношенням:

$$M_T = b_6 i_L^2, \quad (10)$$

де  $b_6$  – постійний коефіцієнт:  $b_6 = 0,555$ .

З урахуванням рівнянь (9) і (10) оберти якоря двигуна визначаються співвідношенням:

$$\frac{dn}{dt} = b_7 i_L^2 - b_8 n - b_9, \quad (11)$$

де  $b_7, b_8, b_9$  – коефіцієнти, обумовлені масою електропоїзда.

При загальній масі електропоїзда, рівної 206320 кг. коефіцієнти  $b_7 - b_9$  мають наступні значення:

$$b_7 = 0,0000066; b_8 = 0,00038; b_9 = 0,012.$$

Зі схеми моделі електропривода можемо скласти рівняння:

$$a_1 \frac{di_L}{dt} + b_3 n i_L + i_L R + E_n = -U_{R\partial}.$$

Звідки:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{a_1} (-b_3 n i_L - i_L \cdot R + E_n - U_{R\partial}). \quad (12)$$

Маємо першу систему рівнянь, що буде реалізована в моделі:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -c_1 n i_L - c_2 i_L + c_3 - c_4 U_{R\partial}; \\ \frac{dn}{dt} = -b_{10} i_L^2 - b_{11} n - b_{12}. \end{cases} \quad (13)$$

Подальші перетворення для отримання оптимізаційної моделі здійснюємо відповідно до вимог принципу максимуму. Енергетичні затрати, що потребують мінімізації, представляються функціоналом вигляду:

$$J = \int_0^{60} K U_{R\partial}^2 dt \rightarrow \min. \quad (14)$$

Граничні значення обертів  $n$  і току  $i_L$  відомі:

$$n(0) = 0; n(60) = 18,5; i_L(0) = 0; i_L(60) = 150;$$

Згідно теореми принципу максимуму складаємо допоміжну функцію  $H$  (рівняння Гамільтоніана).

$$H = \psi_0 (K U_{R\partial}^2) + \psi_1 (-c_1 n - c_2 i_L + c_3 - c_4 U_{R\partial}) + \psi_2 (b_{10} i_L^2 - b_{11} n - b_{12}). \quad (15)$$

Для знаходження керування з умови екстремума (мінімуму функціонала (14)), знаходимо частинну похідну від функції  $H$  по  $U_{R\partial}$  й прирівнюємо її до нуля.

$$\frac{\partial H}{\partial U_{R\partial}} = 2K U_{R\partial} \psi_0 - c_4 \psi_1 = 0.$$

В результаті управління має вид:

$$U_{R\partial} = \frac{c_4 \psi_1}{2K \psi_0}. \quad (16)$$

Для систем з максимальною швидкістю  $\psi_0 = -1$ . Таким чином управління визначається як:

$$U_{R\partial} = -\frac{c_4 \psi_1}{2K}. \quad (17)$$

Рівняння для  $\psi_1$  й  $\psi_2$  отримаємо, знайшовши часткові похідні  $H$  по  $i_L$  й  $n$ :

$$\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial i_L} = \psi_1 c_1 n + \psi_1 c_2 - 2\psi_2 b_{10} i_L, \quad (18)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial n} = \psi_1 c_1 i_L + \psi_2 b_{11}. \quad (19)$$

В результаті маємо другу систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = c_1 \psi_1 n + c_2 \psi_1 - 2b_{10} \psi_2 i_L \\ \frac{d\psi_2}{dt} = c_1 \psi_1 i_L + b_{11} \psi_2 \end{cases} \quad (20)$$

Системи рівнянь (13) і (20) визначають оптимізаційну математичну модель. Схема моделі, з урахуванням її реалізації в пакеті MATLAB, представлена на рис. 4.

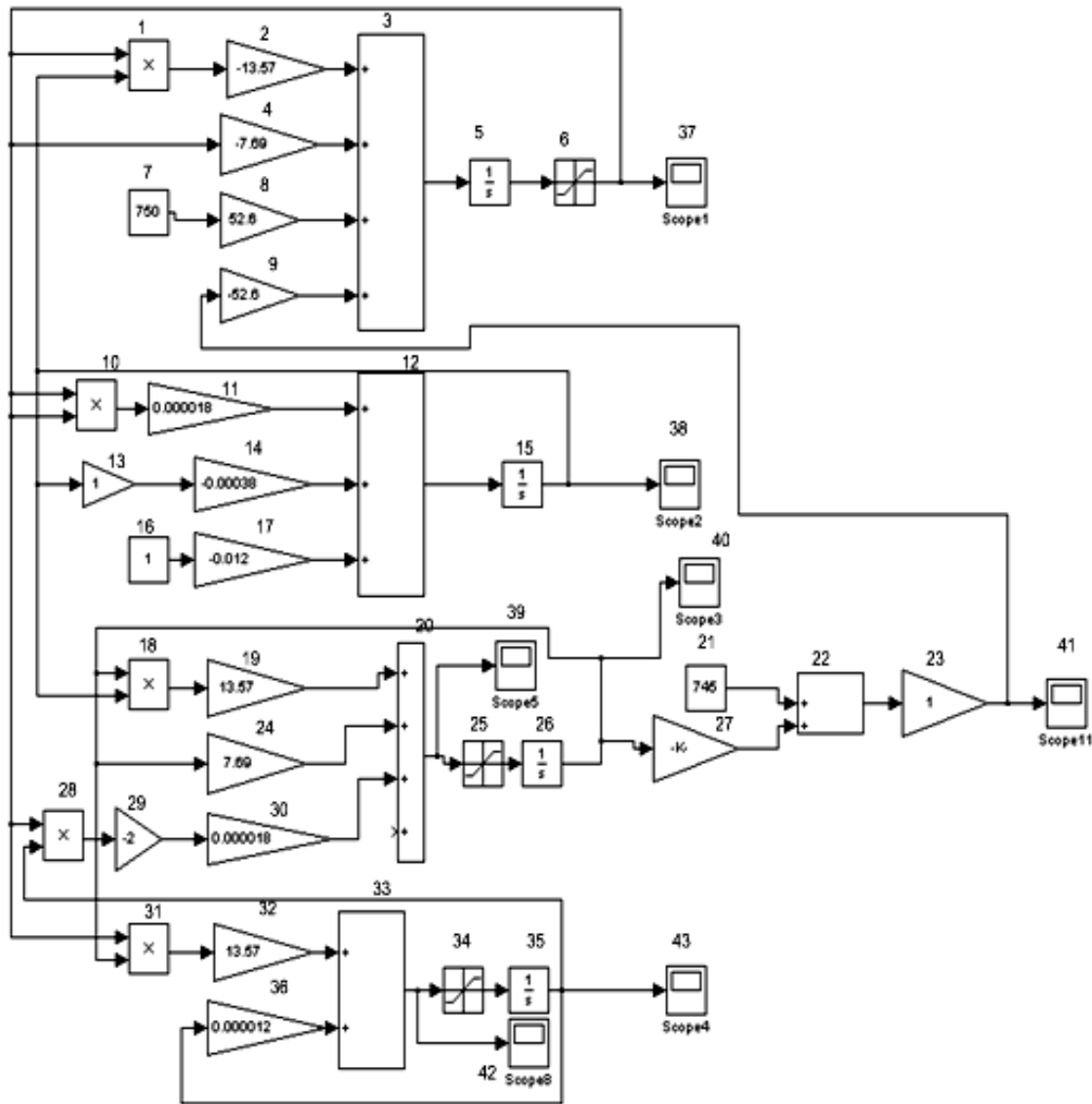


Рис. 4. Функціональна схема оптимізаційної моделі

Для дослідження електропривода потяга в замкнутій системі керування особлива увага приділяється розробленій моделі блоку додаткового резистора. Суть розроблення полягає в наступному. Керування розгоном (набором швидкості) електропотяга здійснюється за рахунок зменшення опору  $R_\delta$ , тобто відключення ступеней реостатного резистора (значення ступеней реостатного резистора фіксовані). Моменти переключення реостатного резистора з однієї ступені на іншу визначають темп розгону електропотяга. Перші дві ступені відключаються у визначені моменти часу, інші ступені керуються струмом якоря  $i_a$ . Зі збільшенням швидкості руху  $V$ , зростає швидкість обертання якоря двигуна ( $n$ ). Отже, збільшується значення  $E$  (тобто ЕРС).

При постійному значенні  $U_{R\delta}$  – струм у колі буде зменшуватися зі збільшенням  $n$ .

Оскільки активні опори обмоток  $L_A$  і  $L_B$  в порівнянні з  $R_\delta$  – малі ( $L_A \approx L_B \approx 0,03$  Ом,  $R_\delta = 10$  Ом),

то у сталому режимі  $i_{L_A}$  буде визначатися величиною напруги  $U_2$  ( $U_2 = U - E - U_{R\delta}$ ) і опором резистора  $R_\delta$ .

Підтримка стабільного струму в колі, значення якого отримуємо в процесі оптимізації, досягається шляхом регулювання  $R_\delta$ , тобто зі збільшенням обертів якоря двигуна  $n$  дискретно зменшувати значення величини опору  $R_\delta$ .  $R_\delta$  можна представити як:  $R_\delta = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$ . В моделі  $R_\delta$  виступає як коефіцієнт підсилення, тобто  $U_{\delta 0} = i_\delta R_\delta$ .

На рис. 5 зображена схема реалізації додаткового резистора  $R_\delta$ . Тут ключі  $K_{11}$ ,  $K_{12}$  замикаються за часом (через 2 сек), а ключі  $K_{13} - K_{113}$  – при досягненні визначеного порога напруги в процесі оптимізації.

На рис. 6 зображена схема керування першим ключем,  $K_1$  – задає темп наростання сигналу.

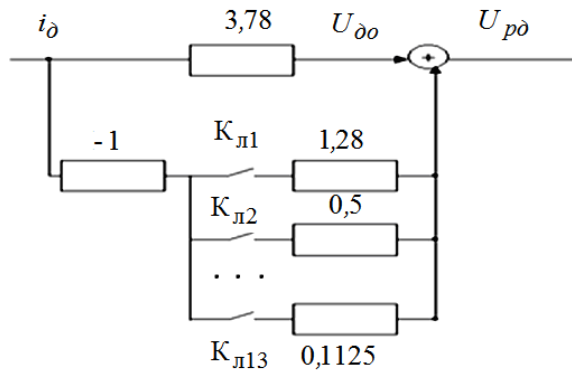


Рис. 5. Схема реалізації додаткового резистора  $R_d$

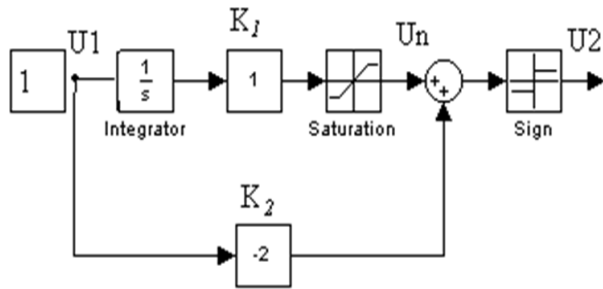


Рис. 6. Схема керування ключем

На рис. 7 – 9 приведені характерні процеси електромеханічної системи потяга в процесі розгону до заданої швидкості з урахуванням навантаженості.

За допомогою оптимізаційної моделі (рис. 4) в процесі досліджень, шляхом підбору початкових значень  $\psi_1$  і  $\psi_2$  для одержання залежності  $U_{Rd}$  від часу за умови мінімізації функціонала (14), фізично – мінімуму енергетичних витрат, визначені значення оптимальних порогів переключення елементів додаткового резистора за умови заданого вибору числа переключень і рівня навантаженості потяга.

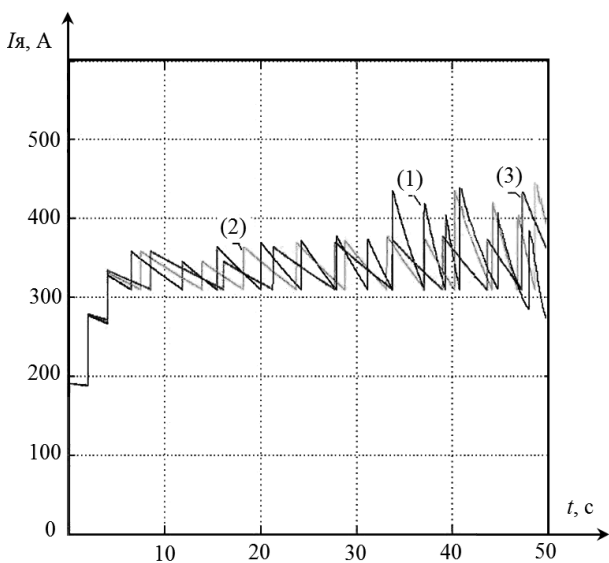


Рис. 7. Формування струму якорного кола при розрахунковій навантаженості (2), при збільшенні навантаженості на 20% (3), при зменшенні навантаженості на 20% (1)

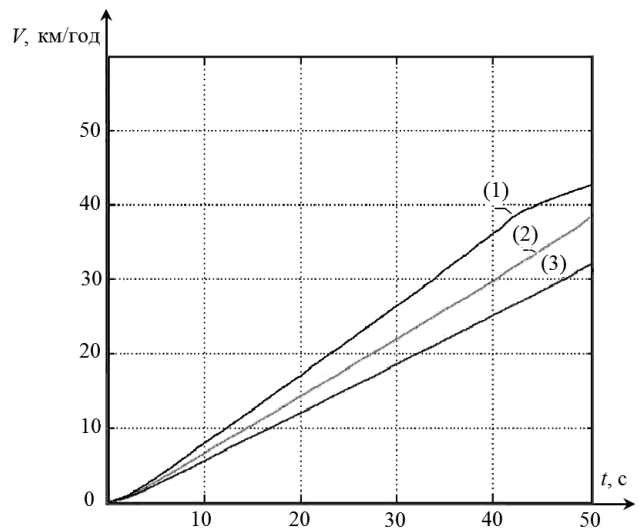


Рис. 8. Формування швидкості  $V$ (км/год) при розрахунковій навантаженості (2), при збільшенні навантаженості на 20% (3), при зменшенні навантаженості на 20% (1)

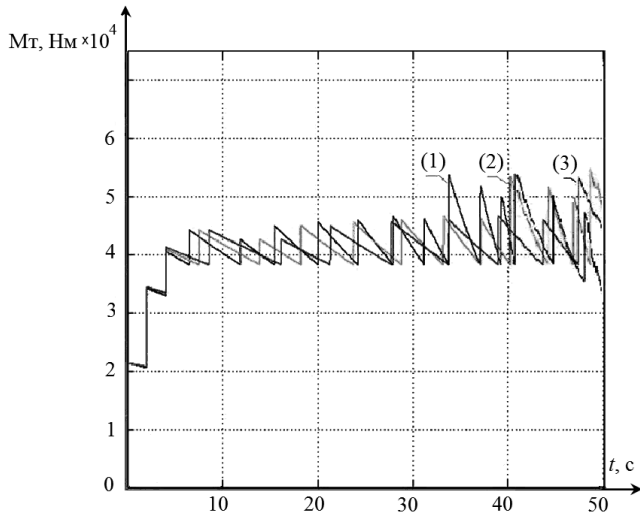


Рис. 9. Формування моменту тяги  $M_t$  при розрахунковій навантаженості (2), при збільшенні навантаженості на 20% (3), при зменшенні навантаженості на 20% (1)

### Висновки

1. На основі аналітичного огляду існуючих сучасних систем керування електропередачі локомотивів з тяговими електроприводами постійного струму запропоновані математичні моделі, які реалізовані у вигляді машинної моделі за допомогою пакету MATLAB і проведені дослідження в робочому діапазоні можливих навантажень і межах допустимих змін параметрів в процесі розгону електропотяга, показали перспективність такого підходу при проектуванні оптимальних систем керування.

2. Визначені параметри системи автоматичного керування тягового електроприводу на основі використання додаткового резистора кола якорної обмотки, які забезпечують задану якість керування та допустимі межі зміни параметрів САК.

3. На підставі досліджень в замкнутій системі керування, які проведені шляхом моделювання за

допомогою пакету MATLAB показано, що структура системи керування із значеннями параметрів, що пропонуються, задовольняють вимогам щодо забезпечення якісних показників та працездатності в робочому проміжку швидкостей (в залежності від завдання – номеру позиції контролера машиніста).

4. Отримана оптимізаційна математична модель може бути використана при розробці систем керування потягів з електроприводом постійного струму з послідовним збудженням як за умови забезпечення мінімуму енергетичних затрат в процесі розгону, так і за умови використання інших критеріїв якості.

5. Запропонована модель адекватно відображує динаміку електропотягу в процесі розгону в залежності від рівня завантаженості і може бути використана для дослідження його електромеханічних підсистем з метою уточнення параметрів систем керування.

6. Для дослідження динаміки електропотягу у межах роботи на пускових позиціях резистивного контролера, може бути використана запропонована спрощена (лінійна) математична модель.

7. Запропонована математична модель може бути використана для проведення досліджень як електропотягу в цілому, так і окремих його підсистем з метою розробки оптимальних систем керування, особливо в перехідних режимах.

8. Розроблені моделі можуть бути використані для синтезу управлінь електроприводом електропотягу як при використанні додаткового резистора так і при використанні широтно-імпульсного регулятора або управлінням напруги живлення.

9. Оптимізаційна модель дає змогу отримати закон зміни значення додаткового резистору за умови мінімізації енергетичних затрат при різних завантаженнях і забезпеченні рівнів обмежень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Horstmann D. 100 Jahre Entwicklung der Antriebsstechnik für elektrische Bahnen. Teil 2 / D. Horstmann, R. Wagner, W-D. Weigel // *Elek. Bahnen*. – 2003. – No 7. – P. 338 – 345.
2. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Запоровский Н.И., Леонов С.Ю.]. – Х.: ХФІ «Транспорт України», 2003. – 248 с.
3. Запоровський М.Й. Синтез управлінь для оптимізації динамічних процесів електроприводу змінного струму / М.Й. Запоровський, В.В. Скороделов, М.В. Мезенцев // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Вип. 4(50). Полтава. 2018. С. 38-41.
4. Грибко В.В. Мікропроцесорні системи керування електроприводами / В.В. Грибко, В.Ю. Кучерук, О.М. Возняк – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.
5. Isermann R. Digital Control Systems: Volume 1: Fundamentals, Deterministic Control / R. Isermann – Springer Science & Business Media, 2013. – 336 p.
6. Dressler Helmuk MICAS – Microcomputer für Fahrzeuge // *Electrische Bahnen*. – 1981.– Vol. 79. – №12. – P. 411 – 417.
7. Поповіч М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Поповіч, О.Ю. Лозинський. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
8. Запоровський М.Й. Розробка та дослідження алгоритмів цифрової системи автоматичного регулювання (САР) електропередачі дизель-поїзда / М.Й. Запоровський, О.К. Пермяков // *Тези доповідей шостої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації» - Черкаси-Баку-Бельсько-Бяла-Харків-2018*. – С. 60.
9. Запоровський Н.И. К вопросу разработки цифровой системы автоматического регулирования электропередачи дизель-поезда / Н.И. Запоровский, О.К. Пермяков // *«Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» - Полтава-Баку-Харків-Жиліна - 2018*. – С. 10.
10. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления / А.А. Ерофеев – СПб.: Политехника, 2001.
11. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
12. М.В. Мезенцев, М.Й. Запоровський, М.В. Липчанський. Розроблення та дослідження системи керування електропередачі дизель-поїзда на основі методів цифрового управління // *Системи управління, навігації та зв'язку*. — Полтава, ПИТУ, 2019. - Випуск 2(54). - С. 46-50.

Received (Надійшла) 12.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.01.2022

### Optimization model of the electric train with the electric drive of dc

M. Zapolovsky, I. Zykov, M. Mezentsev, V. Noskov

**Abstract.** The issues of development of the optimization mathematical model of the electric train with the electric drive of a direct current with consecutive excitation and realization in the MATLAB package for the purpose of construction of a control system on the basis of a method of the principle of a maximum are considered. A review of the literature on the topic and analysis of existing approaches to solving problems of modeling complex electromechanical systems and the synthesis of control systems in this area, in particular control systems that minimize energy costs. Mathematical models of the studied control objects are constructed, modeling of their functioning depending on the level of loading is carried out. Analytical relations are obtained, which can be used to develop the SAR structure of the electric drive of the electric train and calculate its parameters with a given quality criterion. The conducted researches of the optimization model confirm its operability and its efficiency at development of control systems at the set criterion of quality and degree of loading.

**Keywords:** optimization mathematical model, DC electric drive, control system, maximum principle, minimization of energy costs.

Є. І. Калінін<sup>1</sup>, М. А. Кусков<sup>2</sup>, О. М. Бельорін-Еррера<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup> Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ПОВОРОТУ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОГО ТРАКТОРА

**Анотація.** Предметом досліджень статті є динаміка повороту колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою при особливих умовах функціонування еластичного пневматика. Метою роботи є аналіз моделі руху колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою при врахуванні особливостей формування дотичної сили тяги колеса та динаміки повороту. Завдання дослідження полягають у отриманні залежностей кінематичних характеристик та моменту опору колісного трактора при повороті. Застосовувані методи: методи системного аналізу результатів експериментальних та теоретичних досліджень. Отримані результати: розглянуто задачу повороту трактора з шарнірно-зчленованою рамою на агрофонах з різною несучою здатністю. Проаналізовано формування моменту опору повороту трактора в залежності від кута між повздовжніми вісями секцій. Встановлено, що аналіз процесу повороту, проведений з позицій кінематики окремих секцій, повною мірою не відображає специфіку повороту трактора в різних умовах його експлуатації. Спотворення заданої траєкторії криволінійного руху є наслідком впливу сил взаємодії еластичних пневматиків коліс з ґрунтом і відцентрових сил, що виявляються під час руху на швидкостях, які перевищують 6 км/год. Практична значущість роботи полягає у тому, що, на основі проведеного системного аналізу, введені вимоги на виконання транспортних робіт з метою підвищення тягово-зчіпних властивостей та покращення прохідності транспортно-технологічного агрегату.

**Ключові слова:** трактор; шарнірно-зчленована рама, поворот, момент опору, кінематичні характеристики, гакове навантаження, ведучий міст.

### Вступ

У підвищенні ефективності сільськогосподарського виробництва та прискоренні науково-технічного прогресу значна роль приділяється новій сільськогосподарській техніці, яка повинна підвищити продуктивність праці на основному обробітку ґрунту в 1,5...1,8 рази та знизити питому витрату палива на 10...12%.

Тенденція, що спостерігається в останні роки, до широкого використання колісних шарнірно-зчленованих тракторів пояснюється їх універсалізацією та кращою агрегатованістю з різними сільськогосподарськими, дорожніми та вантажними машинами, а також підвищеною маневреністю у порівнянні з тракторами, що мають керовані колеса. Завдяки високим швидкостям руху та встановленому спеціальному обладнанню такі трактори протягом усього року можуть використовуватися з багатовісними причепами на транспортних роботах, успішно конкуруючи за собівартістю виконаної роботи з великовантажними автомобілями.

У найбільш загальному випадку колісна машина відтворює дуже складні рухи.

Водночас, від сил, що діють у контактні колісного рушія з дорогою, залежать такі основні експлуатаційні властивості колісних машин, як тягово-швидкісні характеристики, поворотність, стійкість, прохідність та деякі інші.

У розвитку теорії руху колісних машин велика частка робіт належить таким вченим як Г.В. Зімельев, Б.С. Фалькевич, А.С. Литвинов, Я.М. Певзер, Р.В. Ротенберг, В.Ф. Бабков, головних конструкторів заводів та багатьох інших вчених та інженерів [1 – 8].

Поворотність – властивість колісної машини здійснювати повороти із заданою кривизною на місцевості [9, 10].

Теорія повороту колісного трактора із шарнірно-зчленованою рамою давно цікавить дослідників. Немає досліджень повороту трактора з шарнірно-зчленованою рамою при зміні зчіпних властивостей колеса. Саме тому сформуована мета роботи, яка полягає в наступному.

**Мета роботи** – аналіз моделі руху колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою при врахуванні особливостей формування дотичної сили тяги колеса та динаміки повороту.

Завдання дослідження полягають у отриманні залежностей кінематичних характеристик та моменту опору колісного трактора при повороті.

### Усталений поворот колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою

В процесі дослідження кута між осьовими лініями задньої секції шарнірно-зчленованого трактора та причіпного агрегату на повороті слід розрізняти три періоди.

1. Період входу в поворот, який поділяється на дві фази: трактор та причіпний агрегат рухаються за змінними радіусами; трактор рухається із постійним радіусом повороту, а причіпний агрегат ще із змінним.

2. Період усталеного руху на повороті, коли трактор і причіпний агрегат рухаються навколо єдиного центру повороту.

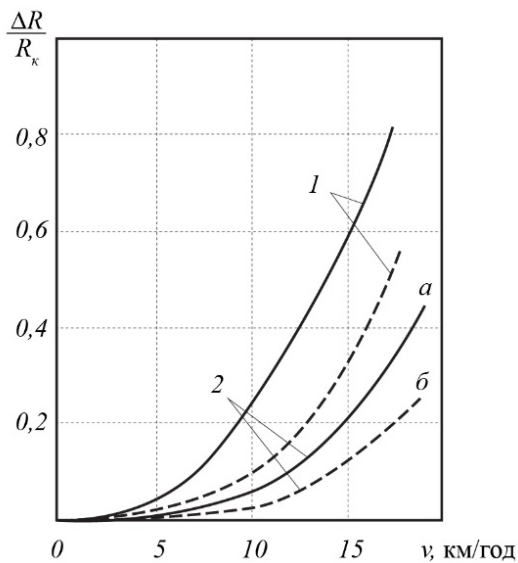
3. Період виходу із повороту. Він поділяється на дві фази: трактор та причіпний агрегат рухаються зі змінними радіусами повороту; трактор рухається прямолінійно, а причіпний агрегат ще кривою змінної кривизни.

Аналіз процесу повороту, проведений з позицій кінематики окремих секцій [9 – 21], повною мірою не відображає специфіку повороту трактора в різних умовах його експлуатації.

Спотворення заданої траєкторії криволінійного руху є наслідком впливу сил взаємодії еластичних пневматиків коліс з ґрунтом і відцентрових сил, що виявляються під час руху на швидкостях, які перевищують 6 км/год.

Істотний вплив на стійкість руху та керованість трактора надають вертикальні навантаження на колеса, характеристики шин, внутрішній тиск у них та конструкція гідравлічного приводу рульового управління.

Приріст  $\Delta R$  кінематичного радіусу  $R_k$ , що визначається кутом  $\alpha$  між поздовжніми вісями секцій, відбувається в результаті сумарної дії бічного відведення коліс та поперечного зміщення ґрунту (рис. 1).



**Рис. 1.** Залежність відносного приросту радіусу повороту  $\frac{\Delta R}{R_k}$  від швидкості руху трактора  $v$ , внутрішнього тиску в шинах  $p_{ш} = 0,08$  МПа (1) та  $p_{ш} = 0,15$  МПа і вертикального навантаження на колеса при повороті трактора на щільному ґрунті без плугу (а) та в агрегаті з плугом ПЛН-5-35 (б)

На щільних ґрунтах, при достатньому зчепленні пневматичного колеса із ґрунтом, збільшення радіусу повороту визначатиметься переважно бічним відведенням коліс, що функціонально залежить від еластичності встановлених шин.

На м'яких ґрунтах, особливо при поворотах з ексцентрично прикладеним гаковим навантаженням, що має місце при виконанні орних робіт, помітний вплив на траєкторію руху має пластична деформація ґрунту. Зменшення внутрішнього тиску в шинах  $p_{ш}$  завжди призводить до зниження коефіцієнту опору відведення, а збільшення вертикальних навантажень на колеса підвищує здатність шин протистояти бічному відведенню.

З рис. 1 видно, що збільшення відносного радіусу повороту  $\frac{\Delta R}{R_k}$  трактора ХТЗ-243К.20 при  $\alpha_{max}$  значно збільшується, з підвищенням швидкості руху,

досягаючи при  $v = 15$  км/год і  $p_{ш} = 0,08$  МПа величини 0,6. При цьому, замість заданого куту  $\alpha_{max}$  мінімального радіуса повороту в 5,5 м, дійсний радіус повороту дорівнює 8,8 м.

Інтенсивність збільшення підвищується з падінням внутрішнього тиску в шинах. Відцентрові сили, що зростають з підвищенням швидкості руху, викликають збільшення кутів відведення за рахунок поперечної податливості шин і зміщення ґрунту.

Поворот колісного шарнірно-зчленованого трактора без гакового навантаження можна представити як поворот кожної секції навколо вісі симетрії свого моста та підтягування секції, що має менше вагове навантаження.

Поворот трактора ХТЗ-243К.20 здійснюється підтягуванням задньої секції, вага якої становить 36% від загальної ваги трактора. При навішуванні плуга ПЛН-5-35 навантаження на передній та задній мости вирівнюються і зближення секцій відбувається за рахунок їх підтягування.

Значне гакове навантаження зміщує центр повороту задньої секції. Відбувається поворот її з ковзанням навколо точки прикладання гакового навантаження та підтягуванням передньої секції трактора.

При повороті ( $\alpha = const$ ) трактора, шарнір повороту якого знаходиться посередині поздовжньої бази, колеса задньої секції рухаються по сліду, прокладеному колесами більш навантаженої передньої секції.

При вході в поворот і виході з нього гідравлічним приводом рульового управління секціям надається відносний рух.

Поворот їх в абсолютному русі відбувається навколо різних миттєвих центрів обертання, і траєкторії руху коліс зміщуються.

Колеса задньої секції, зсуваючись з ущільненого сліду, прокладають нову колію, деформуючи ґрунт як у вертикальному напрямку, так і у напрямках дії бічної сили та зворотному вектору швидкості руху трактора (у разі роботи коліс у ведучому режимі).

Величина коефіцієнту опору коченню задньої секції на ораному полі збільшується до 220% у порівнянні з рухом за раніше ущільненим ґрунтом.

Крім того, спостерігається підвищення бічного зміщення коліс, викликаного пластичністю рихлого недеформованого ґрунту.

Додаткові опори повороту трактора, що з'являються, долаються повертаючою силою, що розвивається в циліндрі повороту. Для правильного вибору основних параметрів гідравлічного приводу та механізму рульового управління необхідно знати величину та характер сил, що діють на трактор при повороті.

На тракторі ХТЗ-243К.20 поставлений експеримент, метою якого було виявити залежність моменту опору повороту від різних експлуатаційних факторів (швидкості руху, навантажень на колеса, ґрунтової несучої поверхні та кількості включених мостів). Момент опору повороту визначався як добуток сили, що повертає, на плече прикладання її відносно шарніра повороту.

Зі збільшенням кута  $\alpha$  між секціями момент опору повороту  $M$  зростає при повороті трактора на місці (рис. 2). Навантаження в системі рульового управління зручно оцінювати за величиною страгуючого моменту  $M_0$  при  $\alpha = 0$  і крутості характеристик

$$K_m = \frac{dM}{d\alpha}$$

моменту опору повороту  $M$ . Зі зменшенням щільності ґрунту та збільшенням вагового навантаження на колеса величина  $M_0$  зростає.

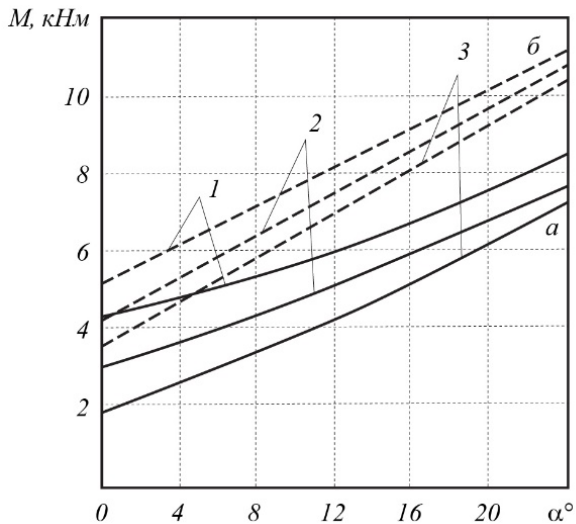


Рис. 2. Графік зміни моменту опору  $M$  в залежності від кута між повздовжніми вісями секцій  $\alpha$  при повороті трактора на місці на ораному полі (1), стерні колосових (2) та цілині (3)

На рис. 3 представлена залежність  $M = f(\alpha)$  при різних гакових навантаженнях, постійній швидкості руху трактора  $v = 2,6$  км/год, одному (криві 4, 5) і двох (криві 1, 2, 3) ввімкнених мостах.

### Висновки

При повороті трактора, що рухається з одним ввімкненим мостом (криві 4, 5), момент опору повороту зі збільшенням кута  $\alpha$  падає, причому з підвищенням швидкості руху інтенсивність падіння  $M$  збільшується.

Відцентрові сили, що сприяють зближенню секцій при вході трактора в поворот і перешкоджають виходу його з криволінійного руху, мають складну залежність від швидкості руху, кута  $\alpha$  і швидкості його зміни.

Потужність, що витрачається гідравлічним приводом, зі зростанням кута  $\alpha$  падає, що особливо відчутно при русі трактора з високими швидкостями.

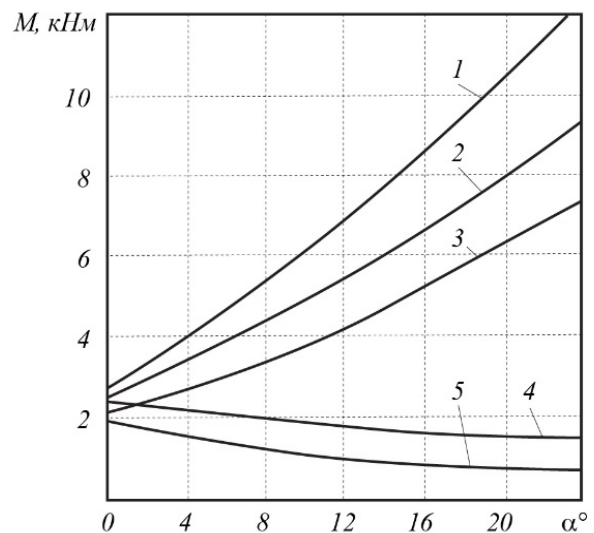


Рис. 3. Графік зміни моменту опору повороту  $M$  трактора, що рухається з постійною швидкістю в залежності від кута  $\alpha$  та гакового навантаження  $P_{\text{зак}} = 33$  кН (1),  $P_{\text{зак}} = 22,6$  кН (2),  $P_{\text{зак}} = 1,4$  кН (3),  $P_{\text{зак}} = 1,38$  кН (4) та  $P_{\text{зак}} = 0$  кН (5)

Незважаючи на зайве поворотність та прагнення до збільшення кута  $\alpha$ , мимовільний поворот трактора неможливий.

Встановлені в рульовому управлінні запірні клапани виключають можливість ризикання трактора, що визначається зоною нечутливості золотникового розподільника, яка навіть при незначних навантаженнях у зовнішньому гідравлічному ланцюгу становить  $\pm 1,5 \dots 2,2$  мм.

Встановлено, що ввімкнення другого моста (криві 1, 2, 3) змінює характер залежності  $M = f(\alpha)$ . Пояснюється це закручуванням замкнутої трансмісії, пропорційним величині зближення центрів мостів.

Колеса обох секцій з ковзанням перекочуються при зростанні бічних і дотичних навантажень, що залежать від жорсткості трансмісії, що закручується, і зчеплення з ґрунтом.

Збільшення  $P_{\text{кр}}$  призводить до зміщення показників у бік збільшення  $M_0$  і  $K_m$ .

При певних значеннях  $P_{\text{кр}}$  поворот трактора на великі кути  $\alpha$  стає неможливим внаслідок обмеження максимальної сили, що повертає, налаштуванням запобіжного клапана гідравлічної системи рульового управління.

Таким чином, слід зазначити, що для зменшення зносу шин другий міст слід включати на транспортних роботах тільки у випадку, якщо необхідно підвищити зчепні якості та покращити прохідність.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вершинский Л.В., Позин Б.М., Трояновская И.П. (2006) "Модель стационарного поворота колесной машины с шарнирно-сочлененной рамой", *Вестник ЧГАУ*, Т.47, С. 17–21
2. Лебедев А.Т., Калінін Є.І., Шуляк М.Л., Колеснік І.В. (2016) "Аналитична модель повороту трактора з шарнірнозчленованою рамою", *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка*, Вип. 173, С. 161 – 167.
3. Калінін Є.І. (2010) "Аналіз зміщення центра ваги напівнавісної машини при її функціонуванні", *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Зб. наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*, Вип. 14 (28), С. 216-224.



4. Fashutdinov M., Khafizov K., Galiev I., Gabdrifikov F. and Khaliullin F. (2020) "Research of dynamics of turning of machine-tractor aggregate with tractor on wheeled-crawler mover", *BIO Web Conf. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources"*, 17, pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700056>
5. Masahisa Watanabe, Kenshi Sakai (2020) "Numerical analysis of steering instability in an agricultural tractor induced by bouncing and sliding", *Biosystems Engineering*, 192, pp. 108-115, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.014>
6. Ahmed O.B., Goupillon J.F. (1997) "Predicting the ride vibration of an agricultural tractor", *Journal of Terramechanics*, 34, pp. 1-11, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(97\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(97)00013-X)
7. Crolla D.A., Horton D.N.L., Stayner R.M. (1990) "Effect of tyre modelling on tractor ride vibration predictions", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 47, pp. 55-77, DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(90\)80029-T](https://doi.org/10.1016/0021-8634(90)80029-T)
8. Fanga H., Ruixia Fan, Thuilot B., Martinet P. (2006) "Trajectory tracking control of farm vehicles in presence of sliding", *Robotics and Autonomous Systems*, 54(10), pp. 828-839, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.011>
9. Xiongze Han, Hak-Jin Kim, Chan Woo Jeon, Hee Chang Moon, Jung Hun Kim, Sang Yup Yi (2019) "Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation", *Biosystems Engineering*, 178, pp. 70-85, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.003>
10. Hubert M., Ludewig F., Dorbolo S., Vandewalle N. (2014) "Bouncing dynamics of a spring", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 272, pp. 1-7, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physd.2014.01.002>
11. Вершинский Л.В. (2005) "Поворотливость сочлененной колесной машины", *Актуальные проблемы автомобильного, железнодорожного, трубопроводного транспорта: материалы научно-технической конференции*, С. 249-255
12. Лебедев А.Т., Калінін Є.І. (2009) "Оцінка можливості підвищення тягово-енергетичних властивостей машинно-тракторного агрегату при виконанні орних робіт на агрофоні підвищеної вологості шляхом встановлення здвоєних шин", *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Серія: Тракторна енергетика в рослинництві*, Вип. 89, С. 37-45.
13. Kayacan Erk., Kayacan Erd., Ramon H., Saeys W. (2015) "Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor", *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, pp. 78-87, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.012>
14. Zhen Li, Muneshi Mitsuoka, Eiji Inoue, Takashi Okayasu, Yasumaru Hirai, Zhongxiang Zhu (2016) "Parameter sensitivity for tractor lateral stability against Phase I overturn on random road surfaces", *Biosystems Engineering*, 150, pp. 10-23, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.004>
15. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22-27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
16. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 117-121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>
17. Зиков І. С., Кучук Н. Г., Шматков С. І. Синтез архітектури комп'ютерної системи управління транзакціями e-learning. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 3. С. 60-66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>
18. Nechausov A., Mamusuc I., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 21 - 26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>
19. Кучук Н. Г. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних / Н. Г. Кучук, В. Ю. Мерлак, В. В. Скороделов // *Сучасні інформаційні системи = Advanced Information Systems*. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 97-102. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>
20. Chaoran Sun, Hiroshi Nakashima, Hiroshi Shimizu, Juro Miyasaka, Katsuaki Ohdoi (2019) "Physics engine application to overturning dynamics analysis on banks and uniform slopes for an agricultural tractor with a rollover protective structure", *Biosystems Engineering*, 185, pp. 150-160, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.005>
21. Yoon J., Cho W., Kang J., Koo B., Yi K. (2010) Design and evaluation of a unified chassis control system for rollover prevention and vehicle stability improvement on a virtual test track", *Control Engineering Practice*, 18 (6), pp. 585-597, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.02.012>

Received (Надійшла) 24.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

### Features of rotation of the articulated tractor

Ye. Kalinin, M. Kuskov, O. Bellorin-Herrera

**Annotation.** The subject of research is the dynamics of turning a wheeled tractor with an articulated frame under special conditions for the functioning of an elastic pneumatic. The goal of the work is to analyze the model of movement of a wheeled tractor with an articulated frame, taking into account the features of the formation of the tangential force of the wheel traction and the dynamics of the turn. The tasks of the study are to obtain the dependences of the kinematic characteristics and the moment of resistance of a wheeled tractor when turning. **Applied methods:** methods of system analysis of the results of experimental and theoretical studies. **The obtained results:** the problem of turning a tractor with an articulated frame on agricultural backgrounds with different bearing capacity is considered. The formation of the moment of resistance to the rotation of the tractor is analyzed depending on the angle between the longitudinal axes of the sections. It has been established that the analysis of the turning process, carried out from the point of view of the kinematics of individual sections, does not fully reflect the specifics of turning the tractor in various conditions of its operation. The distortion of the given trajectory of the curvilinear movement is a consequence of the influence of the interaction forces of the elastic tires of the wheels with the ground and the centrifugal forces detected when moving at speeds exceeding 6 km/h. **The practical significance of the work** lies in the fact that, on the basis of the conducted system analysis, requirements were introduced for the performance of transport work in order to increase the traction and coupling properties and improve the patency of the transport and technological unit.

**Keywords:** tractor; articulated frame, rotation, moment of resistance, kinematic characteristics, hook load, drive axle.

О. В. Шефер, О. І. Лактіонов, О. В. Михайленко

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

**Анотація.** Вимоги щодо змісту процесів інформатизації в рамках «Індустрії 4.0» потребують розробки сучасних інформаційних систем щодо прийняття рішень в різних галузях. Проведений аналіз змісту та структури складних технічних систем, методології, напрямів та існуючих засобів прийняття рішень дозволив систематизувати процес прийняття рішень. За результатами досліджень з'ясовано ряд узагальнених рекомендацій стосовно побудови систем підтримки прийняття рішень. Отримані результати дослідження процесу прийняття рішень складних технічних систем, при розробці відповідних засобів, дозволять враховувати існуючі обмеження та оптимізувати процес оцінювання, відбору, прогнозування тощо.

**Ключові слова:** складна система, прийняття рішень, інформаційна система, технологія, програмний засіб.

### Вступ

Епоха «Індустрії 4.0» активно розвивається на теренах України, де використовуються інформаційні технології [1]. Інструментарій досліджень у кожній сфері передбачає мінімізацію впливу людського фактору за рахунок використання технологій прийняття рішень.

Ознакою ефективності функціонування інформаційних систем, у останніх дослідженнях, є зменшення витрат часу щодо процесу прийняття рішень, зменшення витрат ресурсів на розробку, використання програмного продукту тощо [2]. Тому здебільшого спостерігається використання методології штучного інтелекту [3]. За рахунок недостатньої інформативності первинних оцінок [4] виникає проблема стосовно точності прогнозів, котрі здійснюються за допомогою існуючого інструментарію систем підтримки прийняття рішень.

У зв'язку з цим необхідно систематизувати існуючі методології досліджень саме складних технічних систем (ергачічних або людино-машинних) з точки зору процесів прийняття рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Залежно від мети та завдань досліджень структура систем різна та має певні стани. Тому обґрунтовується математичне відображення систем за допомогою певного математичного апарату [5]. Більшості досліджень характерний теоретико-множинний підхід щодо опису систем, так як вказаний математичний апарат є більш простішим у порівнянні з іншими. Існуючі різновиди інструментарію досліджень процесу прийняття рішень являють собою технологію, котра опирається на певну методологію або вчення [6]. Виходячи з цього, здійснюючи математичну постановку завдання, при дослідженні складної технічної системи, важливою передумовою є виконання опису системи з використанням відповідного рівня складності математичного апарату. Це дозволяє підвищити ефективність процесу досліджень за рахунок реалізації відповідних технологій у інформаційних системах (програмних засобах).

Результати аналітичного вивчення існуючого досвіду інформаційних систем прийняття рішень вказують на деякі протиріччя та недостатньо вирі-

шені частини проблем. Недостатньо вирішеною частиною проблеми лишається формування структури вимог щодо інструментарію дослідження складних технічних систем (ергачічних), де присутні два і більше елементи підсистем. Прикладом таких систем є людино-машинні системи, що використовуються у промисловості, авіації, побуті.

Відповідно до напрямку вказаного дослідження акцентуємо увагу на типі інформаційних систем «Системи підтримки прийняття рішень», котрим характерний певний зміст та структура щодо особливостей їх побудови й функціонування.

**Мета статті:** дослідити методологію та структуру прийняття рішень, що надасть можливість сформулювати рекомендації для розробки системи підтримки прийняття рішень.

### Виклад основного матеріалу

Дослідження стосовно прийняття рішень у складних технічних системах, опираючись на основну методологічну посилку, розглядають вирішення конкретної задачі. Власне це спонукає до існування напрямів досліджень (стратегій використання методів).

З [7] відомо декілька класичних напрямів прийняття рішень: управління, аналіз, планування і прогнозування, де кожному напрямку характерний певний зміст, що складається з етапів. Наприклад, системний аналіз передбачає наявність наступних етапів дослідження: мета, обмеження, формування альтернатив, формування та вибір критеріїв ефективності, синтез адекватності моделі, розробка рекомендацій [8]. Формування етапів дослідження вибору управлінського рішення та опис процесу вирішення поставлених задач вивчався у [9].

Розглянемо відмінності між вказаними напрямками, щоб з'ясувати їх сутність. Так, відомо управління – дуже складний процес, котрий передбачає існування теми, мети, завдань, форми, методи й зворотній зв'язок, де існують об'єкт і суб'єкт. У дослідженні [10] розглядається методологія прийняття управлінського рішення щодо вибору стратегічного напрямку розвитку підприємств. Враховуючи певні обмеження, стосовно особливостей використаних інших методів, ідеєю дослідження є використання

удосконаленого методу аналізу ієрархій [10]. Цінністю запропонованого підходу – набуття подальшого розвитку методу аналізу ієрархій що, на відміну від існуючих, дозволяє вирішити задачу пріоритету стратегій розвитку підприємства.

Так з [11] відомо, процес управління враховує певні складові моделі. При цьому відмітимо, крім моделей при прийнятті управлінських рішень враховують й інші фактори: ризик, час відведений для прийняття рішення, політику організації, ступінь підтримки керівника колективом та його особисті якості [12]. Також варто відмітити використання в управлінні певними об'єктами методів штучного інтелекту [13], котрі на сьогоднішній день вважаються найбільш обговорюваними і ефективними.

Цінністю підходу [14] є врахування теоретико-методологічних основ досліджень, які фактично є стратегіями досліджень. Тобто потрібно враховувати значно ширший набір факторів та розглядати технології реалізації вказаних ідей за допомогою програмних засобів.

Тому вирішення задачі управління при прийнятті рішень передбачає: визначення шкал досліджень, формування масиву критеріїв, формування вибірки дослідження (альтернатив), формування досліджуваних моделей, обґрунтування підходів щодо врахування зовнішніх факторів, визначення інструментарію або тактики використання методів дослідження.

Другою задачею, що вирішується при прийнятті рішень є задача аналізу або пошуку найкращої альтернативи за певними обмеженнями чи без. Вказаний напрям досліджень розглядався у [13, 15], де дослідженню піддавалися способи мінімізації пілоутворення з використанням запропонованої алгоритмізації методів. Етапами пошуку оптимальної альтернативи є: визначення цільової функції, що враховує певні обмеження, визначення питомої ваги та досліджуваних критеріїв.

Наступний напрям прийняття рішень – прогнозування [16]. Визначення певних тенденцій потребує підготовки вихідних даних. Детально процес підготовки вихідних даних розглядався у [17]. Фактично вирішувані задачі процесу прогнозування описуються широким набором відомих та новітніх методів, зокрема: регресійні моделі, ковзної середньої, експоненціального згладжування, статистичної екстраполяції тощо [17].

Дослідно-експериментальне дослідження [18] присвячене ймовірнісному прогнозуванню процесів ціноутворення на фондових ринках. Цінністю дослідження є покращення існуючих прогнозів за допомогою запропонованого підходу. Розглянутий досвід щодо прогнозування зорієнтований на фіксацію і дослідження певних оцінок за конкретний відрізок часу. Реалізація вказаної задачі прийняття рішень складних систем потребує обґрунтування інструментарію у залежності від гіпотез досліджень.

Дослідно-експериментальне дослідження [17], має на меті розгляд системи прийняття рішень не тільки при плануванні, а ще й при керуванні рухом мобільних об'єктів. Тобто вказана система прийнят-

тя рішень зорієнтована на вирішення як мінімум двох задач. Окрім того відомі й алгоритми та методи планування, що використовуються при прийнятті рішень [19].

Тобто вирішення задачі прогнозування зорієнтовано на процес ретельної підготовки вихідних оцінок певним інструментарієм шляхом використання відомих методів або розробкою нових методів. Практичним результатом дослідження є інформація стосовно прогнозу об'єкту досліду.

Серед існуючих напрямів досліджень варто виділити [20], де виділені напрями реалізації інформаційних систем. При цьому існуючі дослідження досить різносторонні, що проявляється саме завданнями, гіпотезою досліджень. Одні розглядають значно ширші аспекти [22], вивченню піддається певна методологія. Розробка інформаційної системи розглядається не що інше як інструмент. Інші – досліджують виключно процес розробки системи прийняття рішень з точки зору програмування [21].

Враховуючи існуючий досвід, реалізація ідей досліджень опирається на теоретико-методологічні основи проведення досліджень при прийнятті рішень. Кожна програма досліджень переслідує декілька етапів, де обґрунтовується філософія підходу: шкали, методи, критерії, альтернативи, цільові функції та обмеження. При цьому варто зазначити стосовно вузько направленості існуючих підходів, де запропонований інструментарій дослідження здатний вирішити лише певну конкретну задачу і не є універсальним. Проте, створені методи можуть бути алгоритмізовані та реалізовані у програмних засобах. Існуючі засоби прийняття рішень реалізують певні методи щодо прийняття рішень конкретної наукової задачі [22]. З точки зору розробки, – програмні засоби мають певну архітектуру структура якої залежить від підходів проектування.

Так у дослідно експериментальній роботі [23] наводиться приклад побудови системи підтримки прийняття рішень у банку. Кожна підсистема реалізує конкретний набір методів, що вирішують певні задачі.

У роботі [24] розглядається існуюча архітектура інформаційних систем та акцентується увага на удосконалення систем підтримки прийняття рішень за рахунок використання сховищ даних. Ефективність виконання завдань зростає за рахунок розробки інформаційної системи прийняття рішень [25, 26].

Серед існуючого досвіду дослідно-експериментальних досліджень систем підтримки прийняття рішень виявлено недоліки, а саме [27]:

1. Психологічні проблеми застосування вказаних систем.
2. Верифікація рекомендацій систем прийняття рішень.
3. Формалізація процедури перевірки множини критеріїв на незалежність за перевагами.

Тому, система підтримки прийняття рішень – засіб, що дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень у складних технічних системах шляхом їх автоматизації. Залежно від сформованих

критеріїв до мови програмування, особливостей досліджуваного об'єкта, процес розробки вказаної інформаційної системи умовно складається з двох відомих частин: 1. обґрунтування інструментарію дослідження з врахуванням ідей життєвого циклу моделі; 2. обґрунтування структури інформаційної системи, де слід з'ясувати архітектуру, функціонал та його використання тощо.

Враховуючи проаналізований існуючий досвід [1–27], сформовано рекомендації щодо побудови системи підтримки прийняття рішень. Запропонована інформаційна система дозволить підвищити ефективність прийняття рішень за рахунок виключення людського фактору, зменшити час на процес прийняття рішень, об'єктивізувати процес отримання оцінок щодо прийняття рішень. Окрім того, програмно реалізована технологія прийняття рішень, щодо відбору складних технічних систем, повинна за досліджуваними ознаками ефективності переважати існуючі. Структурно-логічна схема дослідження складної технічної системи показана на рис. 1, де побудована на основі [1–27].

ПРОЦЕС ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНОЇ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ
Підготовка до реалізації системи підтримки прийняття рішень
Побудова математичної моделі та дослідження її адекватності
З'ясування структури досліджуваних альтернатив Обґрунтування критеріїв оцінювання, відбору складних технічних систем
Програмна реалізація запропонованої технології діагностики складних технічних систем
Експериментальна верифікація програмного засобу

Рис. 1. Структурно-логічна схема дослідження процесу прийняття рішень у складних технічних системах

Розглянемо кроки реалізації процесу прийняття рішень у складних технічних системах (крок 1–6).

**Крок 1.** Процес підготовки до реалізації системи підтримки прийняття рішень розпочинається з формування гіпотези, загальних завдань дослідження та складання плану науково-дослідної роботи. При цьому з'ясовується тип задачі, котра буде розглядатися і експериментально досліджуватися.

**Крок 2.** Здійснюється формальний опис постановки завдання щодо визначення математичної моделі технічної системи науково-дослідної роботи. Отримана математична модель складної технічної системи піддається дослідженню на предмет адекватності з використанням відомого математичного

апарату. Теоретично обґрунтована адекватність математичної моделі складної системи вказує на готовність до використання у дослідженні.

**Крок 3.** Визначення змісту досліджуваних складних систем (альтернатив). Формування первинних оцінок складних систем, котрі використовуються у запропонованому математичному апараті.

**Крок 4.** Обґрунтування критеріїв дослідження щодо обрання складних систем (альтернатив).

**Крок 5.** Програмна реалізація запропонованої технології з використанням певної мови програмування. Проектування системи підтримки прийняття рішень слід виконувати за існуючими вимогами до конструювання комп'ютерних систем: опис вимог; опис специфікацій системи; розроблення системи; тестування, оцінка надійності і якості системи.

**Крок 6.** Експериментальна верифікація запропонованих математичних моделей на існуючих комбінаціях оцінок вказаного дослідження. За необхідності уточнення змісту математичної моделі складної системи. За умови отримання результатів дослідження, що не задовольняють людину котра приймає рішення, здійснюється перехід на Крок 1. Інакше процес прийняття рішень завершено. Між іншим, досліджувана складна технічна система, з часом, може зазнавати модифікацій, що варто враховувати при моделюванні.

Запропонований підхід прийняття рішень є загальною методологічною посилкою, котру варто враховувати при побудові системи прийняття рішень.

## Висновки

В результаті досліджень складних систем проведено аналіз процесу прийняття рішень у вказаних системах та існуючих технологіях. Сформовані узагальнені рекомендації щодо проектування конкретної системи підтримки прийняття рішень складної технічної системи.

Методології та напрями досліджень прийняття рішень складних систем вказують на існування різного роду інструментарію, що вирішують задачі: аналізу; прогнозування; планування тощо.

З метою автоматизації процесу прийняття рішень здійснюють його автоматизацію, зокрема програмну реалізацію.

Перспективою наступних досліджень є формалізація завдання стосовно розробки системи підтримки прийняття рішень складної людино-машинної системи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Запорожець Т. В. Індустрія 4.0: генезис цілей і завдань держави від першої промислової революції / Т. В. Запорожець. // Public Administration: Theory and Practice. – 2019. – №1. – С. 21–32.
2. Vasiuta Kostiantyn Метод синтезу варіантів рішень у відкритій експертній системі пункту управління повітряних сил з урахуванням ресурсно-часових обмежень / Kostiantyn Vasiuta, Dmytro Chopenko, Nataliia Harmash // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2021. – Т. 1 (63). – С. 74–80.
3. Skakalina E. Інтелектуальне управління логістичними процесами з використанням генетичних алгоритмів / E. Skakalina // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2021. – Т. 1 (63). – С. 111–114.
4. Голуб С. В. Побудова ешелонів у поліагентних функціоналах для прогнозування кількості захворювань на covid-19 в Україні / С. В. Голуб, С. Ю. Куницька. // Математичні машини і системи. – 2021. – №2. – С. 45–51.
5. Lievi L. Сучасні інтелектуальні методи моделювання складних технологічних об'єктів / L. Lievi, O. Zuma. // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2021. – С. 49–53.

6. Методи і засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах: Навч. посібн. / Е. Г. Петров, М. В. Новожилова, І. В. Гребеннік; за ред. Е. Г. Петрова. – К.: Техніка, 2004. – 256 с.
7. Братушка С. М. Системи підтримки прийняття рішень : навчальний посібник для самостійного вивчення дисципліни / С. М. Братушка, С. М. Новак, С. О. Хайлук. – Суми : ДВНЗ “УАБС НБУ”, 2010. – 265 с.
8. Роїк, О. М. Системний аналіз. Навчальний посібник / О. М. Роїк, А. А. Шиян, Л.О. Нікіфорова – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 83 с.
9. Кваша Т. К. Вибір управлінського рішення у сфері економічної безпеки на основі багатокритеріальної моделі в умовах невизначеності / Т. К. Кваша // Економіко-математичне моделювання соціально-економічних систем. – 2013. – Вип. 18. – С. 122–136.
10. Ставицький О. В. Методологія прийняття управлінського рішення щодо вибору стратегічного напрямку розвитку підприємств / О. В. Ставицький // Агросвіт. – 2015. – № 3-4. – С. 59–65.
11. Галіцин В. К. Методологія дослідження і формування управлінських рішень / В. К. Галіцин, О. П. Суслів, Н. К. Самченко // Проблеми економіки. – 2018. – № 2. – С. 184–190.
12. Орлів М. С. Підготовка і прийняття управлінських рішень : навч.-метод. матеріали / М. С. Орлів ; упоряд. Г. І. Бондаренко. – К. : НАДУ, 2013. – 40 с.
13. Ситник В.Ф. Системи підтримки прийняття рішень: Навч. Посіб. – К. КНЕУ, 2009. – 614 с.
14. Григорук П. М. Характеристика методологічних підходів дослідження процесу прийняття рішень / П. М. Григорук, Н. А. Хрущ // Kreatywność i innowacyjność w zarządzaniu – egzemplifikacje teoretyczne i empiryczne. *Studia Zarządzania i Finansów*. – Poznań : Wydawnictwo Wyższej Szkoły Bankowej w Poznaniu, 2016. – № 10. – С. 29-38.
15. Тверда О. Я., Ткачук К. К., Давиденко Ю. А. Порівняльний аналіз способів мінімізації пилоутворення з відвалів гранітних кар’єрів // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 2(10). – С. 40–46.
16. Мулеса О. Ю. Розробка еволюційного методу для прогнозування часових рядів / О. Ю. Мулеса, В. Є. Снитюк. // *Automation of Technological and Business Processes*. – 2020. – №12. – С. 4–9.
17. Демиденко М.А. Системи підтримки прийняття рішень : навч. посіб. / М.А. Демиденко; Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – Д. : 2016. – 104 с.
18. Бідюк П. І. Ймовірнісне прогнозування процесів ціноутворення на фондових ринках / П. І. Бідюк, А. В. Федоров // Системні дослідження та інформаційні технології : науково-технічний журнал. – 2009. – № 1. – С. 65–73.
19. Конспект лекцій з курсу “Системи прийняття рішень” для студентів напрямку підготовки 6.030502 “Економічна кібернетика”, спеціальності 051 “Економіка” / С. В. Гринчуцька – Тернопіль, ТНТУ імені І. Пулюя, 2017, 130 с.
20. Грибков, С. В. Розробка СППР управління виробництвом / С. В. Грибков, О. Л. Седих // *Almanahul SWorld (Молдова)*. – 2020. – Вип. 4. – С. 52–56.
21. Лифар В. О. Моделі, методи та інформаційні технології оцінки техногенного ризику об’єктів підвищеної небезпеки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.13.06 “Інформаційні технології” / Лифар В. О. – Миколаїв, 2017. – 42 с.
22. Використання методів підтримки прийняття рішень при пошуку джерел атак на комп’ютерні мережі в умовах невизначеності / [В. В. Литвинов, Н. Стоянов, І. С. Скїтер та ін.]. // *Математичні машини і системи*. – 2019. – №4. – С. 38–51.
23. Бідюк П.І., Коршевнюк Л.О. проектування комп’ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень: Навчальний посібник – Київ: ННК“ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2010. – 340 с.
24. Верес О. М. Види архітектури систем підтримки прийняття рішень / О. М. Верес // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2010. – № 685 : Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – С. 190–197.
25. Особливості проектування систем підтримки лікувальних рішень / Н.І. Мельникова, К.В. Стебліна // *Математичні машини і системи*. – 2014. – № 1. – С. 92-100.
26. Andrii Perekrst, Mykhailo Kushch-Zhyrko, Vita Ogar, Olga Zalunina, Oleksandr Bilyk, Yevheniia Chebotarova, "Key Performance Indicators Assessment Methodology Principles Adaptation for Heating Systems of Administrative and Residential Buildings", *Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP) 2020 IEEE*, 2020. С. 1–4.
27. Методи та засоби підтримки прийняття рішень / В.Г. Тоценко // *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. – 2007. – Т. 9, № 3. – С. 98–104.

Received (Надійшла) 01.10.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.01.2022

### Research of the decision-making process in complex technical systems

A. Shefer, A. Laktionov, O. Mykhailenko

**Abstract.** Requirements for the content of informatization processes in the framework of "Industry 4.0" require the development of modern information systems for decision-making in different industries. The analysis of the content and structure of complex technical systems, methodology, directions and existing means of decision-making allowed to systematize the decision-making process. The research reveals a number of generalized recommendations for building decision support systems. The process of researching a complex technical system takes into account the individual stages. Preparation for the implementation of the decision-making system, where the topic, aim, tasks and hypotheses are set. Depending on the type of research, the problem appropriate tools are selected. Construction of a mathematical model and its research is carried out in accordance with the life cycle of the model. It is proposed to use the following stages of research of complex technical systems. Identification of alternatives to the study of complex technical systems and their scales. Formation of research criteria for complex technical systems, for example, criteria for evaluation, selection of research objects (alternatives). Program implementation, validation and experimental verification of the proposed approach. In the framework of the operation of the proposed solutions, it is necessary to take into account the relevance of the researched model, software functionality, which can be improved. The results of the study of the decision-making process of complex technical systems, in the development of appropriate tools, will take into account existing limitations and optimize the process of evaluation, selection, forecasting and more.

**Keywords:** complex system, decision making, information system, technology, software.

O. Barabash, V. Kolumbet

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky KPI", Kyiv, Ukraine

## MULTIAGENT APPROACH TO COMPUTER MANAGEMENT IN A HETEROGENEOUS DISTRIBUTED COMPUTER ENVIRONMENT

**Abstract.** The reliability of modern computing control systems in a heterogeneous distributed computing environment, along with efficiency, survivability, security, control efficiency, is an important component of their quality. Increasingly, these systems fall into the category of "critical", have an absolute impact on the activities of organizations and enterprises within which they operate. The loss of such systems, even for a short time, leads to serious problems related to loss of income, unforeseen costs, downtime of production and personnel, loss of time, and sometimes man-made disasters. As you know, the greatest impact on the reliability of control systems has the reliability and fault tolerance of a set of software and hardware. Therefore, solving problems related to improving the reliability of the software part of the systems is the most urgent task. Currently, significant results have been obtained in the field of evaluation and forecasting of reliability indicators of elements and typical software packages at the stage of their design; a large number of methods known to algorithms and programs are known; a number of normative documents on project reliability assessment have been developed. However, the task of real-time reliability assessment, when accurate and operational accounting of a number of factors is required, has not been sufficiently solved. To solve the problem of multi-agent approach to computing control in a heterogeneous distributed computing environment used methods of systems analysis, set theory - to develop models of task distribution, models of tasks and computing resources, general systems theory - to study and develop methods of task distribution, logic-theory theory. for modeling computational processes. The article considers a multi-agent approach to computing control in a heterogeneous distributed computing environment. The algorithm is based on the use of economic mechanisms to regulate the supply and demand of resources in the computing environment. The architecture of the multi-agent approach and the functions of the agents are described. Particular attention is paid to calculating the reliability of the task plan based on the logical-probabilistic method.

**Keywords:** multiagent control, agents, distributed computing, reliability, computational complexity.

### Introduction

Currently, much attention in the field of Grid systems and cloud infrastructures is paid to the development of the fundamentals of distributed computing in solving large-scale scientific problems in various fields, as well as developing new methods and algorithms for managing computing in heterogeneous computing environment (HCE). complex hybrid structure. The hybrid node includes computing modules that support different parallel programming technologies and differ in their computational characteristics. Heterogeneity of computing environments, a wide range of tasks and the presence of hybrid nodes in their composition and the need to ensure the scalability of computing processes determine the variety of algorithms for managing distributed computing [1,3]. Decentralized multi-agent algorithms [4], as well as algorithms based on the use of elements of economic theory [5] show quite high efficiency.

High competition of user tasks for total resources of HCE leads to the need for comprehensive consideration of the characteristics of these resources in the process of their allocation in order to achieve the required quality of the task [6]. As a rule, in HCE as the main criteria of efficiency of management of distributed calculations such characteristics, as time and cost of performance of tasks of users, an indicator of balancing of loading of resources of environment and coefficient of their usefulness are applied. In addition to satisfying the above

criteria for the quality of the task, one of the fundamental and practically important areas of research on the organization of distributed computing is also to ensure the reliability of the task in a heterogeneous computing environment. Improving the reliability of calculations allows you to better guarantee the fulfillment of other criteria for the quality of the task.

The article considers a multi-agent approach to the management of distributed computing, taking into account the reliability of HCE resources. It is assumed that the resources are provided by software agents, who are endowed with the necessary administrative rights and responsibilities and are grouped into virtual communities to perform user tasks. Task is a specification of the problem-solving process, which contains information about the required resources, running programs, input and output data, as well as other necessary information. If the task requires the execution of a number of interconnected modules, the computational process is carried out in accordance with the plan for solving the problem, which determines the order of execution of modules. The calculation of the reliability of the task plan is based on the logic-probability method [6], which is based on the transition from describing the conditions of reliability of a complex system using the functions of logic algebra to probability functions to determine indicators of this reliability.

Redundancy is one of the simplest and most effective methods of improving the reliability of computer systems [7]. In our case, the backup is the use

of the virtual community of agents of additional nodes, which in case of failure of the main nodes in the execution of the plan of the task can take over their functions. Additional nodes are a loaded reserve and are used in HCE to the same extent as the main nodes. The use of loaded backup is due to the fact that other types of backup, such as unloaded backup, hot backup or multi-task implementation [8], lead to significant overhead and are more suitable for real-time systems. The virtual community of agents uses the reservation of a specific node by the agent who selected that node. Because such redundancy may require too many nodes to achieve the required reliability, the article considers the problem of forming an additional set of nodes to achieve the reliability of the computational process, as close as possible to the specified reliability criterion, taking into account the number of nodes allocated by each agent.

**Analysis of recent research and publications.**

Analysis of modern scientific and information sources in the field of research in the management of computations in a heterogeneous distributed computing environment Grid-systems of computational type. In researches Malashenko Yu.Ye., Konovalov M.G., Nazarova I.O., problems of task management in heterogeneous computer systems are considered [1]. The paper uses methods and tools for managing cloud computing systems [3] and services based on them [3, 5]. Viktorova V.S., Volik B.G., Stepanyants A.S., [6] focus their analysis on the reliability of the computing control system by a combination of computational models and logical-probabilistic method of studying the reliability of structurally complex systems [7] proposed by Cherkesov G.M. and Ryabinin I.A. According to the principle of construction and analysis, there are algorithms for synthesizing the architecture of a real-time computing system, taking into account the requirements for reliability according to Thomas H., Kostenko V.A., Zorina D.A. [8, 9]. Analytical control models [4] and reliability analysis of computing control complex [13] by a combination of computational models based on the economic mechanism of regulating their demand and supply based on security modeling technology of complex systems [14, 15] studied in Feoktistiva AG, Bychkova I.V., Oparina G.A., Izmalkova S., Sonina K., Yudkevich M. Mozhayev A.S. The considered works of researches and publications allow to reveal some features of application of the multiagent approach of management of calculations in the heterogeneous distributed computing environment and search of effective algorithm of interaction of agents and speed of decision-making.

**The aim of the article** is to identify the features of the multi-agent approach to computational management in a heterogeneous distributed computing environment.

**Formulation of the problem**

The conceptual model of HCE is described by structure

$$M = \langle F, Z, N, A, R_{in}, R_{out}, R_{af}, R_{an} \rangle,$$

where

$$R_{in} \subset Z \times F, R_{out} \subset Z \times F, R_{af} \subset A \times F,$$

F is the set of software modules; Z is the set of module parameters; N is the set of HCE nodes; A is the set of agents;  $R_{an} \subset A \times N$  - the relationship between the elements of the sets F, Z, N and A.

Relationships  $R_{in}$  and  $R_{out}$  type "many-to-many" set according to the set of input and output parameters of the modules and thus determine the information-logical connections between the modules. Attitude  $R_{af}$  type "many-to-many" establishes a link between agents and modules that can be performed by agents. Attitude  $R_{an}$  the one-to-many type identifies agent nodes. HCE computing clusters combine homogeneous nodes. Nodes of different clusters have different degrees of reliability. In the HCE computing management system, clusters are represented by agents.

The HCE receives a user request in a non-procedural form: "calculate parameter values from a subset  $Z_{out} \subset Z$  by the values of the parameters from the subset  $Z_{in} \subset Z$ ". In the general case, there may be many S plans in the HCE model to solve this problem. Each of these plans determines which modules with F and in what order should be executed.

You need to build sets S, choose a single plan from this set  $s \in S$ , identify agents with A that will take part in its execution, and assign nodes with N in which plan modules s will be executed. The calculation process must meet the specified time or cost criteria for the effectiveness of the task, as well as strive for a certain indicator of reliability - probability  $p * (t)$  execution of the plan for solving the problem (computational task) at time t of receipt of the task. In this formulation, the task of planning calculations and resource allocation is NP (Non-deterministic Polynomial) - difficult [9].

In order to maintain the commonality of further considerations in the set F, two fictitious modules are introduced  $f_1$  i  $f_2$ , modeling the problem statement. Initial module  $f_1$  has an empty set of input parameters, and uses a subset of parameters as output  $Z_{in} \subset Z$ , thus determining the condition of the task of the initial data of the problem. Target module  $f_2$  receives a subset of parameters  $Z_{out} \subset Z$ , thus determining the condition for setting the desired values of the problem, and has an empty set of output parameters.

The set S of plans for solving the problem can be represented by a bipartite oriented graph

$$G = \langle V, U \rangle.$$

The set V includes subsets  $V_Z$  and  $V_F$  vertices corresponding to the parameters with Z and modules with F included in the plans with S.

The set U has two types of arcs between the vertices with  $V_Z$  and  $V_F$ : input arc connecting the vertex with  $V_Z$  topped with  $V_F$  and determining the relationship of the module with its input parameter, and the output arc connecting the vertex with  $V_F$  topped with  $V_Z$  and determining the relationship of the module with its output parameter.

We assume that the information-logical connections between the modules of the plan s are described by a Boolean matrix W of dimension  $n_f \times n_f$ , where  $n_f$  - number of modules included in plan s.

Matrix element  $w_{i,k} = 1$  means that the module  $f_i$  depends on the input of the module  $f_k$ .

### Computing control algorithm

In this study, computational management is implemented by a multi-agent system.

The hierarchical structure of the system may include two or more levels of functioning of agents. At each level, there may be agents who play different roles and perform different functions. The roles of agents can be permanent and temporary, arising in discrete moments of time in connection with the need to organize collective interaction. Levels of hierarchy of agents differ in the amount of knowledge of agents - agents of the higher level of the hierarchy have more knowledge than agents of lower level of the hierarchy and, in addition, can ask agents of any lower level to obtain local knowledge of these agents.

At each level of the hierarchy, agents can come together in virtual communities, cooperate, and compete within those communities.

The multi-agent system includes computing and resource allocation planning agents. These agents are responsible for building a plan for the task and allocating the resources needed to perform it. The algorithm for constructing a solution plan is based on the use of the tender model of computational work [10] in the allocation of HCE resources and logical-probabilistic analysis of the reliability of the generated plan [6]. The combination of procedures for selecting a coordinator and conducting a tender significantly increases the efficiency of interaction between agents and the speed of decision-making. Here are the main stages of this algorithm:

Actions of the calculation planning agent. → Construction of sets  $S$  of plans for solving the problem. → Formation of a virtual community of resource allocation agents who can participate in the implementation of the resulting set of plans. → Sending the set  $S$  to the formed virtual community of agents. → Actions of resource allocation agents. → Formation by agents of such information: ratings for selection of the agent-coordinator; intentions to implement all modules used in the plans of sets  $S$ ; estimates of time or cost of each module depending on the chosen criterion for solving the problem; probabilities of execution of modules in the nodes. → Sending the generated information to other agents of the virtual community in accordance with the modified tree wave algorithm [11] of communication interaction of agents. → Definition of the coordinating agent. → Actions of the coordinating agent. → Determining the winners of the tender in accordance with the specified criterion of the effectiveness of the problem - the choice of a single plan  $s \in S$  and identifying the agents that will be involved in its implementation. → Calculate the reliability of the plan  $s$  and, if necessary, reserve additional computing resources. → Distribution of bidding results to agents. → Actions of resource allocation agents.

Execution of plan  $s$  modules according to the results of resource allocation.

In the implementation of this algorithm, presented in detail in [12], the main attention is paid to the economic mechanisms of regulation of supply and demand of resources.

As shown in [10], the use of economic mechanisms implemented within the algorithm and provide a system of penalties for agents for violating their nodes allowable limits of computational load, can improve the balancing of resource loads and increase their efficiency.

The following are new aspects of the algorithm related to the logical-probabilistic analysis of the reliability of the task plan.

### Logical-probabilistic model of reliability of the task plan

Let:

$s$  be the solution plan chosen based on the results of the bidding,

$n_a$  - the number of virtual community agents involved in the plan  $s$ ,

$x$  is the set of Boolean variables  $x_{i,j,k}$ , displaying execution events ( $x_{i,j,k} = 1$ ) or non-compliance ( $x_{i,j,k} = 0$ ) element  $f_i$  in the  $k$ -th node isolated by the agent  $a_j, i = \overline{1, n_f}, j = \overline{1, n_a}$ .

Index  $k$  of the variable  $x_{i,j,k}$  determines the main accordingly ( $k = 1$ ) and backup ( $k \geq 2$ ) nodes agent  $a_j$ , allocated for module execution  $f_i$ .

Every agent  $a_j$  can highlight  $c_j$  backup nodes for plan  $s$  modules. It is assumed that all nodes of the same agent are homogeneous. The ability to run modules in the main or backup nodes causes different scenarios of the plan  $s$ .

We introduce the following notation:

$y_i(x)$  - Boolean function, which determines the conditions of the module  $f_i$  in the process of calculating the plan  $s$ ;

$p_{i,j,k}(t)$  - the probability of execution of the module  $f_i$  in the  $k$ -th node of the agent  $a_j$ .

The logic of the reliability of the plan  $s$  is described by formulas

$$y_1(x) \equiv 1; \tag{1}$$

$$y_i(x) = \begin{cases} h_i(x), & \text{if } i = 2, \\ (h_i(x), \text{ if } i = 2, x_{i,j_i,1} h_i(x), \text{ if } i > 2, \end{cases} \tag{2}$$

$$h_i(x) = \bigwedge_{\forall k: w_{i,k}=1} y_k(x), \tag{3}$$

where  $i \in \overline{1, n_f}, k = \overline{1, n_f}, j_i \in \overline{1, n_a}$ .

First, in this scheme, the agent  $a_j$  and allocates to execute module  $f$  the main node.

Boolean function  $y_2(x)$ , which determines the conditions of execution of the target module, is an indicator of the reliability of the plan  $s$ .

After performing all substitutions according to formulas (1) - (3) function  $y_2(x)$  takes the form

$$y_2(x) = \bigwedge_{i=3}^{n_f} x_{i,j_i,1}, \tag{4}$$



where  $j_i \in \overline{1, n_a}$ .

To calculate the reliability of the plan s, the transition [13] is made using the appropriate rules from the function  $y_2(x)$  to the probability function  $P(t)$  of the following form:

$$P(t) = \prod_{i=3}^{n_f} p_{i,j_i,1}(t). \quad (5)$$

Function  $P(t)$  calculates the probability of execution of the only available scenario of the plan s. If  $P(t) < p^*(t)$ , then you need to convert the function  $y_2(x)$  by improving the reliability of the elements of its structure.

Function  $y_2(x)$ , defined by formula (4), presented in disjunctive normal form without objections and, therefore, is monotonic.

This property ensures the absence of elements in its structure, for which the improvement of reliability deteriorates the reliability of the plan s (study system) as a whole [14].

Let,  $J = \{j : c_j = 0, j \in \overline{1, n_a}\}$  - a set of agent indexes that do not have backup nodes.

The process of transforming a function  $y_2(x)$ , corresponding to the plan s without reserving nodes in the function  $y'_2(x)$ , corresponding to the plan s with the reservation of nodes, includes the following steps. If

$$\sum_{j=1}^{n_a} c_j = 0,$$

that is, there is no possibility to reserve nodes, the completion of the transformation, otherwise - determine the index of the module with a minimum probability of its execution:

$$k = \underset{i=3, n_f, j_i \notin J}{\operatorname{argmin}} \left( 1 - \prod_{l=1}^e (1 - \bar{p}_{i,j_i,l}) \right)$$

where  $e = n_{i,j_i}, n_{i,j_i}$  - the number of nodes allocated by the agent  $a_{j_i}$  and module  $f_i$ .

Reduction  $c_{jk}$  per unit. Reserve an additional agent node  $a_{jk}$  для модуля  $f_k$  by replacing the item  $x_{k,jk,e}$  becomes a Boolean formula element,  $x_{k,jk,e} \vee x_{k,jk,e+1}$ ,  $e = n_{k,jk,e}, n_{k,jk,e}$  - the number of nodes allocated by the agent  $a_{jk}$  module  $f_k$ .

Magnification  $n_k, j_k$  per unit. Casting function  $y'_2(x)$ , obtained as a result of transformation, to the species:

$$\begin{aligned} n &= \prod_{i=3}^{n_f} \sum_{j=1}^{n_a} n_{i,j}; \\ y'_2(x) &= \bigvee_{l=1}^n K_l, \\ K_l &= \bigwedge_{i=3}^{n_f} x_{i,j_i,e}; \end{aligned} \quad (6)$$

where  $e = k_{j_i}, k_{j_i} \in \overline{1, n_{i,j_i}}$

Each elementary conjunction in formula (6) is one of the scenarios of possible implementation of the plan s. Elementary conjunctions of a function  $y'_2(x)$  numbered from 1 to n according to their rank in ascending order. In order to ensure the incompatibility of these scenarios, orthogonalization of the function is performed  $y'_2(x)$  using the algorithm proposed in [13].

Function  $y'_2(x)$ , orthogonal function  $y'_2(x)$ , takes the form

$$y'_2(x) = K_1 \vee \bar{K}_1 K_2 \vee \dots \vee \bar{K}_1 \bar{K}_2 \dots \bar{K}_n - 1K_n.$$

Simplify the function  $y'_2(x)$  by removing identically equal zeros and absorbing conjunctions. Jump with the appropriate rules from the function  $y'_2(x)$  to the probability function  $P'(t)$  the following view:

$$P'(t) = \sum_{i=1}^n p'_i(t),$$

where  $p'_i(t)$  - the probability of execution of the i-th scenario of the plan s.

Calculation of the reliability indicator of the plan s using the function  $P'(t)$ .

If  $P'(t) < p^*(t)$ , then go to step 1. Otherwise - the completion of the transformation.

The above process of redundancy of nodes ensures the achievement of the reliability of the computational process, as close as possible to the specified criterion of reliability, taking into account the restrictions on the number allocated by each agent nodes.

These restrictions ensure the convergence of the node redundancy process.

## Conclusion

Much literature has been devoted to the development of multi-agent distributed computing management systems, which to some extent touches on various aspects of their design, implementation and application. Analysis of the results of these studies shows that there are no finalized and established technologies for the organization of problematic HCE with multi-agent computing management. In this regard, we note a number of important features of the algorithm considered in the article.

In the course of work of algorithm efficiency of interaction of agents and speed of decision-making are provided. After the end of the auction, their participants reach a consistent steady state, which is to some extent analogous to the Nash equilibrium [15], in game-theoretic models.

The algorithm allows to take into account different policies of HCE node administration, helps to improve load balancing and increase resource efficiency, provides a sufficient degree of fairness of the strategy of allocation of these resources based on specified time or cost criteria, and allows to achieve reliability of the task plan to a given criterion.

Further research in this area is related to the development of tools for flexible modernization of algorithms for the functioning of agents by connecting "external" libraries, including different scenarios of these algorithms.

## REFERENCES

1. Malashenko Ju.E., Konovalov M.Gh., Nazarova Y.A. (2011) Task management in heterogeneous computing systems. *Izv. RAN. Theory and control systems*. No. 2. P. 43–61.
2. Skakalina O.V. (2018) Innovative concept of complex distributed control systems. *Control, navigation and communication systems*. Vol. 2, No. 48. P. 24–29.
3. Agrawal D., Jaiswal L. H., Singh I., Chandrasekaran K. (2012) An Evolutionary Approach to Optimizing Cloud Services. *Computer Engineering and Intelligent System*. Vol. 3, No. 4. P. 47–54.
4. Casalicchio, E., Menasce, D.A. (2004) QoS in Grid computing. *IEEE Internet Computing*. Vol. 8, No. 4. P. 85–87.
5. Sukhoroslov O.V. (2015) The combined use of high-performance resources and grid infrastructures within the Everest cloud platform. *Supercomputing Days in Russia: Proceedings of the International Conference, September 28-29, 2015, Moscow*. P. 706–711.
6. Vyktorova V.S., Volyk B.Gh., Stepanjanc A.S. (2006) Reliability Analysis of the Computational Control Complex by the Method of Combining Calculation Models. *Reliability*. No. 2 (17). P. 53–59.
7. Cherkosov Gh.N., Rjabynyn Y.A. (1981) Logical and probabilistic methods for studying the reliability of structurally complex systems. M.: Radio and communication. 264 p.
8. Tomas Kh. Kormen (2006). Algorithms: construction and analysis. Introduction to Algorithms. Chapter 34. M.: Вильямс. 1296 p.
9. Kostenko V.A., Zoryn D.A. (2012) Algorithm for Synthesizing the Architecture of a Real-Time Computing System with Account for Reliability Requirements. *Izv. RAN. Theory and control systems*. No. 3. P. 76–83.
10. Kshemkalyani A. D., Singhal M. (2008) *Distributed Computing: Principles, Algorithms and Systems*. Cambridge University Press. 756 p.
11. Bychkov Y.V., Boghdanova V.Gh., Korsukov A.S., Oparyn Gh.A., Feoktystov A.Gh. (2014) Multi-agent approach to managing distributed computing in a clustered Grid system. *Izv. RAN. Theory and control systems*. No. 5. P. 95–105.
12. Korshunov Ju.M. (1987) *Mathematical foundations of cybernetics*. M.: Energy. 624 p.
13. Feoktystov A.Gh., Bychkov Y.V., Oparyn Gh.A., Kanter A.N. (2014) Multi-agent algorithm for the distribution of computing resources based on the economic mechanism for regulating their supply and demand. *Bulletin of computer and information technologies*. No.1. P. 39–45.
14. Yzmalkov S., Sonyn K., Judkevych M. (2008) Theory of economic mechanisms. *Questions of Economics*. No. 1. P. 4–26.
15. Mozhaev A.S. (1994) Current state and some directions of development of logical and probabilistic methods of systems analysis. *Theory and information technology for modeling the security of complex systems*. St. Petersburg: IPMASH RAN. P. 23–53.
16. Kuchuk Gh.A. (2018) Current state and trends in the development of computer systems of critical applications. *Control, navigation and communication systems*. Vol. 1, No. 47. P. 110–113.
17. Soroka M.Ju. (2020) The method of adapting the behavior of agents in the intelligent training system for the training of air traffic controllers. *Control, navigation and communication systems*. Vol. 2, No. 60. P. 17–20.
18. Ulichev O.S. (2018). Research of models of information dissemination and information influences in social networks. *Control, navigation and communication systems*. Vol. 4, No. 50. P. 147-151.

Received (Надійшла) 23.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

**Мультиагентний підхід до керування обчисленнями  
в гетерогенному розподіленому обчислювальному середовищі**

О. В. Барабаш, В. П. Колумбет

Анотація. Надійність сучасних систем керування обчисленнями в гетерогенному розподіленому обчислювальному середовищі, поряд з ефективністю, живучістю, безпекою, ефективністю керування, є важливою складовою їхньої якості. Все частіше ці системи потрапляють до категорії «критичних», тобто мають абсолютний вплив на діяльність організацій та підприємств, у межах яких вони функціонують. Втрата працездатності таких систем навіть на короткий час призводить до серйозних проблем, пов'язаних із втратою доходу, непередбаченими витратами, простоем виробництва та персоналу, втратами часу, а часом і до техногенних катастроф. Як відомо, найбільший вплив на надійність систем управління надає надійність та відмовостійкість комплексу програмно-технічних засобів. Тому вирішення завдань, пов'язаних із підвищенням надійності функціонування програмної частини систем є найактуальнішим завданням. В даний час отримані значні результати в галузі оцінки та прогнозування показників надійності елементів та типових програмних комплексів на стадії їх проектування; відомо велике число методів, доведених до алгоритмів та програм; розроблено низку нормативних документів щодо проектної оцінки надійності. Однак завдання оцінки надійності в масштабі реального часу, коли необхідний точний та оперативний облік цілого ряду факторів, вирішено недостатньо. Для вирішення задачі мультиагентного підходу керування обчисленнями в гетерогенному розподіленому обчислювальному середовищі використані методи системного аналізу, теорії множин – для розробки моделі розподілу завдань, моделей завдань та обчислювальних ресурсів, загальної теорії систем – для дослідження та розробки методів розподілу завдань, теорії логіко-імовірнісного моделювання – для моделювання обчислювальних процесів. У статті розглянуто мультиагентний підхід керування обчисленнями в гетерогенному розподіленому обчислювальному середовищі. Алгоритм базується на використанні економічних механізмів регулювання попиту і пропозиції ресурсів обчислювального середовища. Описано архітектуру мультиагентного підходу і функції агентів. Особливу увагу приділено розрахунку надійності плану виконання завдання на основі логіко-імовірнісного методу.

Ключові слова: мультиагентне керування, агенти, розподілені обчислення, надійність, розрахункова складність.

О. Ю. Барковська, В. О. Холєв, Д. А. Поліканов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ЗНАЧУЩІСТЬ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ІЗ МАСОВИМ ПАРАЛЕЛІЗМОМ ПРИ ОБРОБЦІ СКАНОВАНИХ ДОКУМЕНТІВ

**Анотація.** У роботі запропоновано узагальнену модель системи класифікації сканованих документів, яка являє організаційно-функціональний, технологічний і програмно-технічний комплекс для класифікації або категоризації документу за ключовими словами, які визначаються частотним словником. Актуальність теми дослідження полягає у скороченні часу впорядкування нових інформаційних ресурсів, що надходять до сховища, завдяки збільшенню швидкості роботи методів покращення якості вихідного зображення безпосередньо перед обробкою та аналізом тексту. **Аналіз результатів** довів ефективність та доцільність використання обчислювачів із масовим паралелізмом для виконання таких задач, як шумопригнічення та зміна значення колірних каналів вихідного повнокольорового зображення, досягаючи прискорення до 53,51% у порівнянні із використанням обчислювального ресурсу центрального процесору.

**Ключові слова:** система, обробка, текст, обчислювач, графічний процесор, багатопоточність, зображення, передобробка, прискорення, інформаційний ресурс, сховище.

### Вступ

Організація електронних бібліотек [1, 2], архівів [3, 4], сховищ електронних інформаційних ресурсів різних масштабів [5, 6] (від традиційних сховищ на підприємствах або персональних сховищ розміром до терабайту, до великих хмарних сховищ, які мають власну універсальну архітектуру) стикаються із процесом безперервного поповнення новими ресурсами (із різною тематичною приналежністю - наукові ресурси, соціальні ресурси, екологічні ресурси, законодавчі ресурси, нормативно-правові ресурси, статистичні ресурси, навчальні ресурси тощо), що, в свою чергу, потребує впорядкування (за автором, назвою, роком видання, видавництвом чи ключовими словами) для полегшення подальшого користування. Подібний процес «накопичення – аналіз – зберігання – доступ користувачів» є звичним для різного типу сховищ, які зустрічаються зараз та стосується усіх категорій інформаційних ресурсів (рис. 1). Задача впорядкування документів передбачає використання методів text processing та text mining, особливістю яких є відсутність структури у вихідних даних (текст) [7, 8]. Дослідження в цій сфері є актуальними на сьогоднішній день, про що свідчить широке використання отриманих результатів у багатьох проблемних галузях: системи категоризації текстових інформаційних ресурсів, пошукові системи тощо [9-11]. Однак, такі вимоги, як скорочення часу обробки та збільшення точності аналізу тексту, є затребуваними та висуваються безперервно незалежно від області практичного застосування.

Особливої уваги вимагає проблема обробки та аналізу тексту, який надходить до системи у вигляді не текстового вихідного файлу, наприклад, у вигляді фото або сканованих документів. Так, при додаванні до електронного архіву старих сканованих друкованих книг або інших друкованих видань, організація автоматичного впоряд-

кування є більш складною процедурою, оскільки передбачає такий етап попередньої обробки документу, як переведення зображення у текстовий вигляд, а вже потім безпосередня робота з текстом [12]. **Аналіз існуючих рішень** показав, що системи розпізнавання тексту [13] застосовують у багатьох областях, наприклад: зчитування даних з бланків, анкет чи білетів; автоматичне розпізнавання автомобільного номера; розпізнавання паспортних даних; вилучення інформації з візитних карток до списку контактів; технологія для допомоги сліпим і слабозорим; оцифрування архівних документів чи старих книг. Критеріями оцінювання існуючих систем, серед яких були розглянуті найпотужніші рішення - ABBYY Finereader, ABBYY Flexicapture, Adobe Acrobat DC, було обрано точність розпізнавання, доступність, легкість використання. Результат аналізу наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Аналіз існуючих аналогів у сфері текстового процесінгу

	Швидкість	Доступність	Легкість використання
ABBYY Finereader	Задовільна	Висока ціна	Потрібен час для навчання
ABBYY Flexicapture	Задовільна	Висока ціна	Важко налаштувати
Adobe Acrobat DC	Задовільна	Висока ціна	Простий у використанні

Таким чином, виконання досліджень із метою досягнення скорочення часу обробки та аналізу ска-

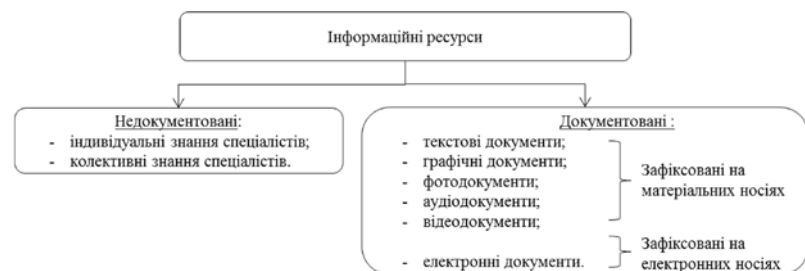


Рис. 1. Категоризація інформаційних ресурсів

нованих документів для організації впорядкованого сховища текстових електронних інформаційних ресурсів є задачею **актуальною**.

### Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є оцінка значущості обчислювальних систем із масовим паралелізмом при обробці сканованих документів, а саме при вирішенні задачі шумопопригнічення та фільтрації сканованих документів.

Для досягнення поставленої мети мають бути вирішені наступні задачі:

- дослідження загальних параметрів систем розпізнавання сканованих документів;
- дослідження існуючих методів шумопопригнічення та сегментації зображень;
- розробка узагальненої моделі класифікації сканованих документів;
- адаптація методів попередньої обробки сканованих документів під обчислювачі із масовим паралелізмом;
- оцінка таймінгу роботи;
- аналіз отриманих результатів.

Дослідження, проведені в рамках даної роботи, зосереджені на скороченні часу попередньої обробки вихідних сканованих документів безпосередньо перед процесінгом тексту.

### Рішення поставленої задачі

Актуальність теми дослідження полягає у скороченні часу впорядкування нових інформаційних ресурсів, що надходять до сховища, завдяки збільшенню швидкості роботи методів покращення якості вихідного зображення безпосередньо перед обробкою та аналізом тексту.

У роботі запропоновано узагальнену модель системи класифікації сканованих документів (рис. 2), яка являє організаційно-функціональний, технологічний і програмно-технічний комплекс для класифікації або категоризації документу за ключовими словами, які визначаються частотним словником. Запропонована узагальнена модель складається з блоків:

- попередньої обробки зображення;
- розпізнавання тексту;
- попередньої обробки тексту [14, 15];
- побудови частотного словника.

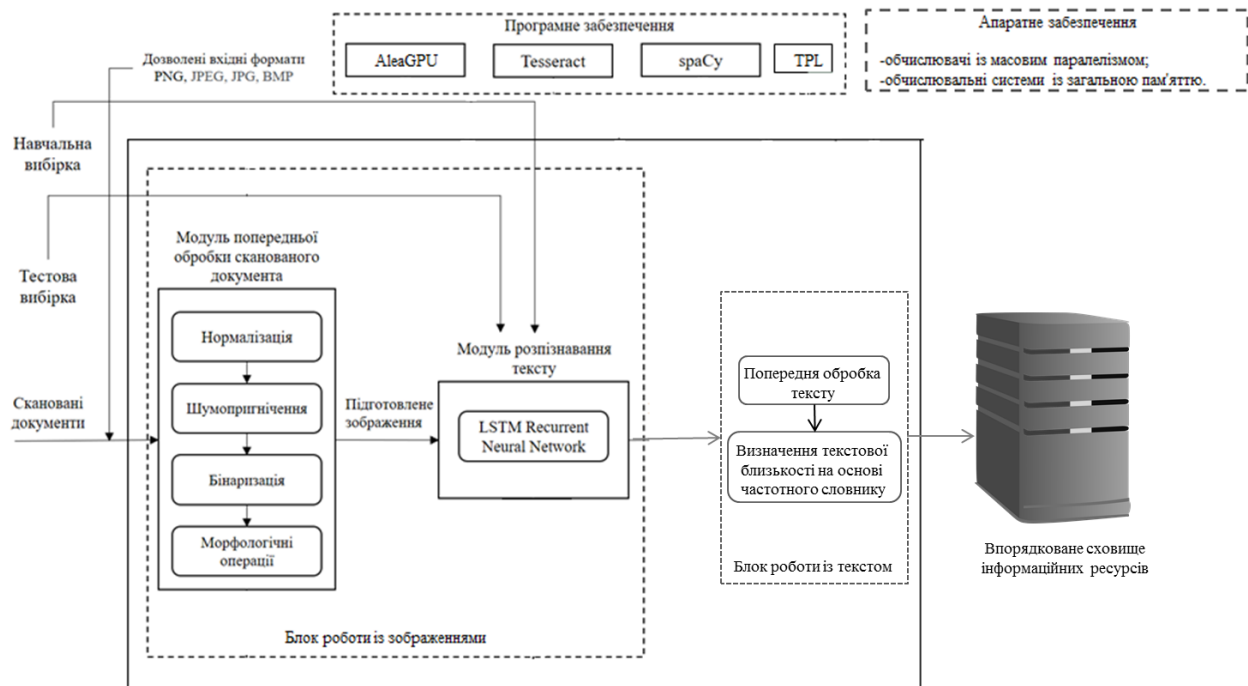


Рис. 2. Узагальнена модель системи класифікації сканованих документів

При цьому, скорочення часу роботи системи можливо як завдяки розпаралелюванню етапу роботи із зображенням, так і етапу роботи з текстом. Робота кожного з зазначених блоків складається з роботи окремих алгоритмів та методів, деякі з яких розглянуті в роботі та виконано їх вдосконалення.

На вхід системи подається сканований документ, який має бути нормалізований, очищений від шумів та бінаризований у модулі попередньої обробки зображення. Запропонована сукупність методів попередньої обробки сканованих документів дозволяє покращити вихідне зображення, що призводить до збільшення точності розпізнавання тексту.

Результатом роботи є побудований частотний словник із визначеною та впорядкованою TF-IDF мірою для зниження значущості слів які зустрічаються різних документах колекції, який подається на вхід класифікатора. Подальша робота полягає у аналізі слів із високим значенням параметру TF-IDF, оскільки слова, у яких значення TF-IDF близьке до нуля, відносяться до загальноуживаних слів, які не можуть дати об'єктивну характеристику документу.

Робота модулю попередньої обробки сканованого документу зосереджена на покращенні якості вихідного зображення перед подачею на модуль розпізнавання тексту. Обробка зображень має високі об-

числовальні вимоги. Низку операцій обробки зображень можна оптимізувати шляхом інтенсивного розпаралелювання обчислень. В даний час одним з найкращих варіантів паралельної обробки зображень є використання обчислень загального призначення на графічних процесорах (GPGPU).

Запропоновані методи досліджені за допомогою професійного стеку розробки CUDA для .NET - Alea GPU, яка дозволяє використовувати повний набір функцій пристрою CUDA, наданих NVIDIA LibDevice, а також паралельні внутрішні функції пристрою CUDA, такі як синхронізація потоків, атомарні операції тощо.

Alea GPU — це повноцінний компілятор, побудований на основі популярної інфраструктури компілятора LLVM і пакета SDK компілятора NVIDIA CUDA.

Код, зібраний за допомогою компілятора Alea GPU для графічного процесора, забезпечує таку ж продуктивність, як і еквівалент CUDA C/C++ або CUDA Fortran.

Використовуючи спеціальну бібліотеку SixLabors.ImageSharp.PixelFormats, виконується шумопоглинання та зміна значення колірних кана-

лів, спочатку із багатопоточністю процесора, а потім використовуючи потоки відеоадаптера.

Для визначення продуктивності були використані три групи зображень із різною роздільною здатністю:

– перша група - зображення високої роздільної здатності (від 3336x2823 до 5893x5597);

– друга група - зображення середньої роздільної здатності (від 1538x864 до 1920x1080);

– третя група - зображення низької роздільної здатності (від 720x539 до 1280x720).

Експеримент проводився на різній кількості зображень (1, 10, 40) при пакетній обробці для того щоб показати ефективність використання потоків графічного обчислювача у залежності від обчислювальної інтенсивності задачі.

Апаратною базою для виконання експерименту є відеоадаптер GEFORCE GTX 1050 TI із графічним процесором GP107 на базі архітектури Pascal:

(кількість кластерів поточкових текстур – 6, кількість поточкових мультипроцесорів – 6, кількість поточкових процесорів – 768).

Приклади роботи усіх запропонованих та досліджуваних методів зображено на рис. 3.

In 1830 there were but twenty-three miles of railroad in operation in the United States, and in that year Kentucky took the initial step in the work west of the Alleghanies. An Act to incorporate the Lexington & Ohio Railway Company was approved by Gov. Metcalf, January 27, 1830. It provided for the construction and re-

а

In 1830 there were but twenty-three miles of railroad in operation in the United States, and in that year Kentucky took the initial step in the work west of the Alleghanies. An Act to incorporate the Lexington & Ohio Railway Company was approved by Gov. Metcalf, January 27, 1830. It provided for the construction and re-

б

In 1830 there were but twenty-three miles of railroad in operation in the United States, and in that year Kentucky took the initial step in the work west of the Alleghanies. An Act to incorporate the Lexington & Ohio Railway Company was approved by Gov. Metcalf, January 27, 1830. It provided for the construction and re-

г

д

Рис. 3. Результати роботи модулю попередньої обробки вихідного зображення:  
а – вихідне зображення, б – результат застосування медіанного фільтру,  
в – результат бінарізації, г – результат морфологічних операцій, д – результат сегментації

При бінарізації методом Оцу, пікселі розділяються на два класи, за розрахованим порогом, при якому досягається мінімальне значення дисперсії. Для зменшення кількості можливих артефактів та збільшенню чіткості тексту до зображення застосовуються морфологічні операції.

Аналіз отриманих результатів (табл. 2, рис. 4) показав, що для зображень високої роздільної здатності потоки процесору із масовим паралелізмом працюють на 53,51% швидше, ніж потоки центрального процесору при найвищому досліджуваному навантаженні при обробці пакету із 10 зображень.

Таблиця 2 – Визначення часу процесінгу зображень

	Час обробки одного зображення, мс			Час обробки п'яти зображень, мс			Час обробки десяти зображень, мс		
	Перша група	Друга група	Третя група	Перша група	Друга група	Третя група	Перша група	Друга група	Третя група
Багатопоточність, забезпечена центральним процесором	0.006	0.012	0.109	0.024	0.053	0.626	0.043	0.101	0.981
Багатопоточність, забезпечена графічним процесором	0.003	0.005	0.175	0.026	0.046	0.336	0.05	0.107	0.525

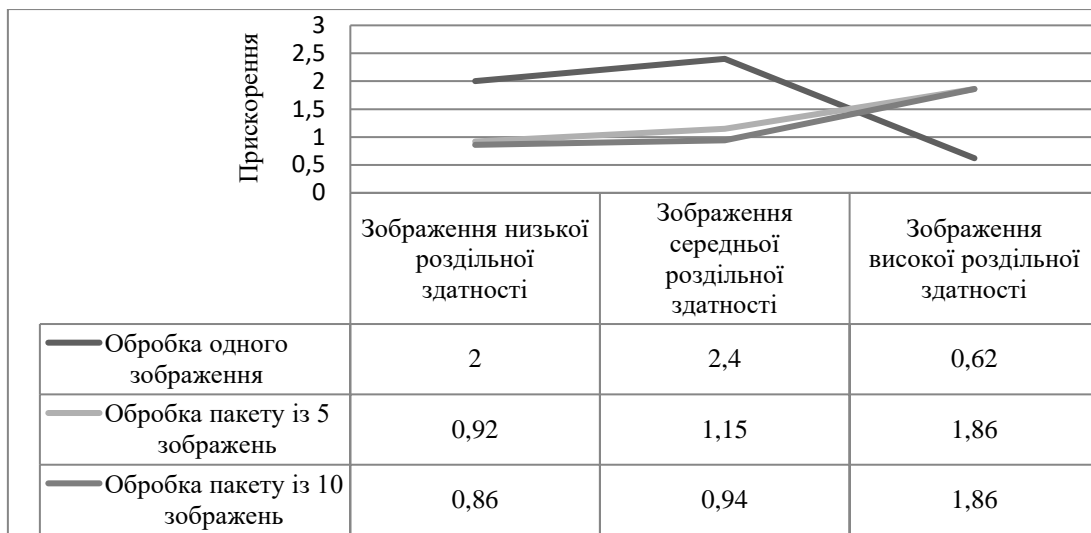


Рис. 4. Прискорення, отримане при паралельній обробці зображень із різною роздільною здатністю на обчислювальних системах із загальною пам'яттю та системах із масовим паралелізмом

Окрім того, результати показують, що збільшення кількості зображень із одного до десяти, при обробці вихідних зображень із високою роздільною здатністю на системах із масовим паралелізмом призводить до збільшення часу обробки лише у 3 рази, що свідчить про особливості вирішення задач загального призначення на графічних процесорах – час на копіювання даних із хосту на пристрій та у зворотньому напрямку не може буди вищим за час, витрачений на виконання обчислень. Так само, як і обробка одного зображення із третьої групи на графічному процесорі не є доцільною.

Вищенаведені результати підтверджують доцільність використання масивно-паралельних обчислювачів для рішення таких задач, як:

- фільтрація,
- бінарізація,
- виконання морфологічних операцій,
- сегментація вихідних повно кольорових зображень різної роздільної здатності.

## Висновки

При дослідженні загальних параметрів існуючих систем розпізнавання сканованих документів (ABBYY Finereader, ABBYY Flexicapture, Adobe Acrobat DC) було виявлено такі недоліки, як недостатня швидкість отримання розпізнаного тексту, а також велика вартість застосунків, що доводить необхідність досліджень у даній галузі із метою скорочення часу впорядкування нових інформаційних ресурсів, що надходять до сховища, завдяки збільшенню швидкості роботи методів покращення якості вихідного зображення безпосередньо перед обробкою та аналізом тексту.

Запропонована у роботі узагальнена модель системи класифікації сканованих документів, являє собою організаційно-функціональний, технологічний і програмно-технічний комплекс для класифікації або категоризації документу за ключовими словами, визначеними у частотному словнику.

Аналіз отриманих результатів (рис. 4) показав, що для зображень високої роздільної здатності потоки процесору із масовим паралелізмом працюють на 53,51% швидше, ніж потоки центрального процесору при найвищому досліджуваному навантаженні при обробці пакету із 10 зображень. Окрім того, результати показують, що

збільшення кількості зображень із одного до десяти, при обробці вихідних зображень із високою роздільною здатністю на системах із масовим паралелізмом призводить до збільшення часу обробки лише у 3 рази, що говорить про доцільність використання обчислювачів із масовим паралелізмом для пакетної обробки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rusyn B., Lytvyn V., Vysotska V., Emmerich M., Pohreliuk L. (2019) The Virtual Library System Design and Development. In: Shakhovska N., Medykovsky M. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing III*. CSIT 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 871. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01069-0\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01069-0_24).
2. Cao, G., Liang, M., & Li, X. (2018). How to make the library smart? The conceptualization of the smart library. *Electron. Libr.*, 36, 811-825.
3. T. Hermawan and R. W. Wardhani, "Implementation AES with digital signature for secure web-based electronic archive," 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863268.
4. Y. Wang, "Design and Implementation of Electronic Archives Information Management Under Cloud Computing Platform," 2019 11th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2019, pp. 154-158, doi: 10.1109/ICMTMA.2019.00041.
5. Y. Yang and J. Shieh, "Data Warehouse Applications in Libraries -- The Development of Library Management Reports," 2016 5th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), 2016, pp. 88-91, doi: 10.1109/IIAI-AAI.2016.129.
6. S. Savanur and K. S. Shreedhara, "Automated data validation for data warehouse testing," 2016 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECCOT), 2016, pp. 223-226, doi: 10.1109/ICEECCOT.2016.7955219.
7. Barkovska, O., Pyvovarova, D., Kholiev, V., Ivashchenko, H., & Rosinskyi, D. (2021). Information object storage model with accelerated text processing methods. In *CEUR Workshop Proceedings* (pp. 286-299).
8. Barkovska, O., Kholiev, V., Pyvovarova, D., Ivashchenko, G., & Rosinskyi, D. (2021). INTERNATIONAL SYSTEM OF KNOWLEDGE EXCHANGE FOR YOUNG SCIENTISTS. *Advanced Information Systems-Sučasni informacijni sistemi*, 5(1), 69-74.
9. M. Lan, C. L. Tan, J. Su and Y. Lu, "Supervised and Traditional Term Weighting Methods for Automatic Text Categorization," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, no. 4, pp. 721-735, April 2009, doi: 10.1109/TPAMI.2008.110.
10. Sang-Bum Kim, Kyoung-Soo Han, Hae-Chang Rim and Sung Hyon Myaeng, "Some Effective Techniques for Naive Bayes Text Classification," in *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 18, no. 11, pp. 1457-1466, Nov. 2006, doi: 10.1109/TKDE.2006.180.
11. Yefeng Zheng, Huiping Li and D. Doermann, "Machine printed text and handwriting identification in noisy document images," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 3, pp. 337-353, March 2004, doi: 10.1109/TPAMI.2004.1262324.
12. R. Smith, "An Overview of the Tesseract OCR Engine," Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007), 2007, pp. 629-633, doi: 10.1109/ICDAR.2007.4376991.
13. Y. -M. Su, H. -W. Peng, K. -W. Huang and C. -S. Yang, "Image processing technology for text recognition," 2019 International Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/TAAI48200.2019.8959877.
14. Olesia Barkovska, Oleg Mikhal, Daria Pyvovarova, Oleksii Liashenko, Vladyslav Diachenko and Maxim Volk, Local Concurrency in Text Block Search Tasks, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. - Volume 8. No. 3, March 2020. - P.690-694.
15. Barkovska O., Pyvovarova D. and Serdechnyi V., Pryskorenyj alghorytm poshuku sliv-obraziv u teksti z adaptivnoju dekompozycijeju vykhidnykh danykh. [Accelerated word-image search algorithm in text with adaptive decomposition of input data]. *Systemy upravlinnja, navigaciji ta zv'jazku* 4 (56), 28-34. (in Ukrainian)

Received (Надійшла) 30.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

### The importance of massively parallel computing systems in scanned documents processing

O. Barkovska, V. Kholiev, D. Polikanov

**Abstract.** The paper proposes a generalized classification model for scanned documents, which represents an organizational-functional, technological and software-hardware complex for document classification or categorization by keywords defined in a frequency dictionary. The relevance of the research topic lies in time reducing for new scanned information resources streamline, due to the increase in the speed of the methods for improving the quality of the original image immediately before processing and analyzing the text on images. The analysis of the results showed the effectiveness and expediency of using massively parallel computers to perform tasks such as noise reduction and changing the value of color channels of the original full-color image, achieving an acceleration of up to 53,51% compared to using the computing resources of the central processor.

**Keywords:** system, processing, text, processor, GPU, multithreading, image, preprocessing, speedup, information resource, storage.

М. О. Волк, О. Г. Лунічкін

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ІЗ САМОВІДНОВЛЕННЯМ

**Анотація.** Одною з властивостей сучасних комп'ютерних систем є забезпечення їх надійної безперервної роботи, що реалізується різними засобами, у тому числі й вбудованими у саму систему. **Предметом** статті є огляд проблеми самовідновлення в комп'ютерних системах. **Мета статті** полягає у створенні класифікаційної бази щодо ймовірних відмов, процесів зберігання стану компонентів системи та задач забезпечення самовідновлення комп'ютерних систем. **Висновки.** Проаналізовано тематичну літературу предметної області. Запропонована класифікація відмов, описані види відновлення із застосуванням бекапів, сформульовані перспективні задачі управління комп'ютерними системами із самовідновленням. Незважаючи на існуючі приклади реалізації принципів самовідновлення у комп'ютерних системах, самовідновлення у вигляді окремих сервісів чи компонентів є новим напрямком досліджень. Результати можуть бути чималого поширення та застосовуватись у розробці більшості програм та пристроїв, інформаційних систем з метою спрощення проектування, налагодження та експлуатації сучасних комп'ютерних систем.

**Ключові слова:** комп'ютерна система, самовідновлення, відмова, бекап.

### Вступ

Сучасні комп'ютерні сервіси не лише стали невід'ємною частиною виробництва та наукової діяльності, але й набули чималого поширення серед повсякденного життя кожної людини. Спілкування, робота, електронні документи, онлайн покупки, банкові операції – велика частка нашої побутової діяльності покладена на комп'ютери та програми. Тож зі зростанням кількості таких сервісів та додатків зростає й складність та відповідальність забезпечення неперервної діяльності таких систем, а саме – стійкості до відмов. Постає актуальною задача з максимальної автоматизації усіх складових забезпечення відмовостійкості – від прогнозування до усунення наслідків відмови.

### Аналіз публікацій

Теорія забезпечення відмовостійкості існує з моменту появи комп'ютерних систем. Проте реалізація відмовостійкості як внутрішньої властивості самої системи, що реалізується окремим сервісом або компонентом системи, є новим напрямом наукових досліджень. Потреба у виокремленні відмовостійкості та самовідновлення як окремих напрямків виникла у зв'язку з надзвичайним поширенням електронних сервісів у побуті. Чимала кількість додатків та відповідного серверного забезпечення потребують великої кількості часу та працівників для підтримки, тому фахівці почали приділяти окрему увагу оптимізації та автоматизації попередження та усунення наслідків відмов.

Саме на виокремлення напряму досліджень та формування термінології спрямована робота автор роботи [1]. Закінчує роботу автор формулюванням тем для подальшого розвитку систем з самовідновленням.

У роботі [2] поглиблюється питання термінології, зокрема наведено приклади алгоритмів самовідновлення у природі. Автори створюють загальну схему процесу самовідновлення та наводять декілька можливих стратегій для реалізації такої властивості системи.

Задля швидкого та ефективного створення програм та апаратних комплексів із самовідновленням необхідні відповідні архітектурні рішення. Тож у ро-

боті [3] формалізовано архітектуру системи із самовідновленням. Для створення додатків пропонується архітектура на основі подій, а для формалізованого опису системи пропонується окреме середовище, яке також спроможне формалізувати різницю між станами системи, на основі яких створюється план відновлення.

Практичне застосування принципів самовідновлення описано у роботі [4]. Автор описує реалізацію самовідновлення у системах, які побудовані на компонентній архітектурі OpenORB. Наведено три приклади застосування такої архітектури у існуючих програмних системах.

Відмовостійкість та самовідновлення є властивостями систем, що подовжують час експлуатації та спрощують обслуговування та підтримку, тому розробники зацікавлені у реалізації таких властивостей у програмах чи пристроях. Із еволюцією програмних технологій та засобів розробки з'являються інструменти, які дозволяють реалізувати вказані принципи на рівні архітектури, фреймворків і навіть мережних протоколів [5-7]. Тож перед дослідниками постає проблема відокремлення та узагальнення моделі та методів самовідновлення. Зокрема, цим питанням займаються автори работ [1, 2]. Теоретичні дослідження доцільно супроводити практичними розробками, як пропонує автор роботи [3], який описує архітектуру системи самовідновлення. Автор [4] описує програмну імплементацію принципів самовідновлення.

З недоліків оглянутої літератури варто зазначити відсутність формалізованого визначення відмови у комп'ютерній системі та не розглянуті механізми забезпечення процесів виявлення відмов та відновлення.

### Постановка проблеми

Перед побудовою системи з самовідновленням необхідно формалізувати відмови та відокремити нештатні ситуації, які вважатимуться відмовами та потребуватимуть процесу відновлення. Також необхідно формалізувати різні етапи відновлення, які у подальшому можуть стати предметом для автоматизації, та, відповідно, основою сервісу або компонентами підсистеми самовідновлення [8-13]. Маючи перелік відмов



та етапів усунення наслідків доцільно запропонувати перспективні напрямки роботи щодо можливої автоматизації та побудови систем із самовідновленням.

Тож метою роботи є створення класифікаційної бази щодо ймовірних відмов, процесів зберігання стану компонентів системи та задач забезпечення самовідновлення комп'ютерних систем.

### Головні причини відмов

1. Помилка у програмі під час виконання. Причиною є помилка у написанні програми або неправильні вхідні дані. Виявляється програмою та генерується виключення, або завершується виконання програми. Для запобігання таких помилок достатньо існуючого механізму виключень.

2. Помилка на рівні операційної системи. Прикладами таких помилок можуть бути:

- читання/запис по некоректному адресу пам'яті,
- ділення на нуль,
- нестача пам'яті та ін.

Операційна система дозволяє обробити ці помилки аналогічно виключенням, але цілісність даних може бути порушена, тому у деяких випадках стан програми доцільно вважати невірним та зупинити виконання. Необхідно застосування окремого механізму відновлення.

3. Пошкодження операційної системи або апаратури. Тобто помилки, які порушують працездатність техніки за незалежних від програми причин. Відновлення роботи програми на ушкодженому комп'ютері неможливо. Для продовження роботи необхідно мати розподілену систему та переводити користувача до іншої машини з максимальним збереженням даних з мінімальним часом відновлення.

### Види бекапів для самовідновлення

Окрім програмних виключень, інші види відмов призводять до втрати екземпляра програми. Якщо активними є декілька екземплярів однієї програми, то при відмові одного залишаються інші, здатні ще деякий час виконувати покладені задачі, поки готується новий екземпляр на зміну ушкодженому. Але, у найгіршому випадку, якщо екземпляр програми лише один, задачею самовідновлення є перезапуск програми із відновленням стану за найкоротший час. Це означає, що стан програми потрібно зберегти до (або під час) відмови (тобто зробити бекап – резервне копіювання даних). У випадку фізичного ушкодження апаратури, яке неможливо передбачити, повністю зберегти актуальний стан програми на момент відмови неможливо. Тому для можливості будь-якого відновлення необхідно заздалегідь зберігати стан програми у іншому місці. За місцем зберігання стану можна поділити механізми самовідновлення на чотири групи.

1. Локальний бекап. Стан програми зберігається на жорсткому диску в комп'ютері, на якому виконується програма. Не захищає від ушкоджень комп'ютера, проте захищає від програмних помилок та некоректних дій користувача у програмі, що призводять лише до зупинки виконання програми. Найпростіший метод зберігання стану, активно використовується у сучасних застосунках. Для повноцінного самовіднов-

лення необхідно додати сервіс, який буде автоматично запускати програму після відмови та повідомляти їй останній бекап.

2. Виділений бекап сервер. Стан програми відсилається на сервер, який умовно вважається невідмовним (тобто, за допомогою адресу цього сервера завжди можна отримати стан програми). Для відновлення роботи системи диспетчеру необхідно обрати новий доступний комп'ютер, завантажити бекап із серверу та запустити програму з останнім збереженим станом.

3. Розподілена однорівнева система. Умовно невідмовного серверу немає, і усі пристрої під загрозою відмови. Тому, в процесі надсилання стану програми, існує ймовірність його втрати водночас з пристроєм або каналом зв'язку. Для відновлення необхідно шукати бекап у функціонуючих пристроях, та запустити програму на новому пристрої. Найскладніша архітектура системи для самовідновлення, адже необхідно якнайширше відсилати стан програми, аби мінімізувати ризик повної втрати даних.

4. Розподілена дворівнева система. На першому (фізичному) рівні є сукупністю розподілених пристроїв аналогічних третьої групи. Відрізняється наявністю другого (хмарного) рівня, який забезпечує надійне зберігання станів програм на віддалених серверах. Другий рівень бере на себе реалізацію гарантованої надійності зберігання даних [14]. Виділення двох рівнів спрощує реалізацію відновлення станів програмних компонентів системи та надає можливість застосувати існуючі хмарні сервіси збереження даних.

За періодичністю зберігання стану можна поділити механізми самовідновлення на три групи:

1. Нерегулярні бекапи. Стан програми зберігається лише у окремих випадках, наприклад, введені важливі дані у інтерфейсі користувача, механізм прогнозування відмов просигналізував про можливість відмови (наприклад, оперативна пам'ять майже закінчилась), користувач натиснув відповідну кнопку та ін. Найлегший у реалізації вид бекапів у реалізації, адже не потрібна оптимізація процесів отримання, відправки та зберігання даних.

2. Регулярні бекапи. Стан програми зберігається з деякою періодичністю. Зазвичай, період береться найменший, який середовище виконання дозволяє роботи. Першим обмеженням періоду бекапу є працездатність комп'ютера – постійне копіювання великого обсягу даних на жорсткий диск знижує продуктивність комп'ютера. Наступним обмеженням є пропускна здатність мережі – мережеве обладнання має пропускну здатність, оператор за тарифом також надає обмежену пропускну здатність. Окрім того, є трафік, необхідний іншим сервісам та додаткам. Тому посилати у мережу бекапи занадто часто також не ефективно.

3. Бекап у реальному часі. Кожна операція, що змінює стан програми, зберігається або відсилається. Таким чином стан програми у бекапі завжди актуальний, та можливо повне відновлення без втрати даних. Але це значно збільшує час виконання програми, адже кожен програмний крок необхідно зберігати або відправляти. Тому такі системи потребують пристрій зберігання з малим часом запису або надійне поєднання зі іншими комп'ютерами у мережі. Також існують меха-

нізми зберігання не усіх даних програми, а історії зміни окремих даних (спираючись на факт, що усі данні неможливо водночас змінити) [15].

Таким чином, механізм самовідновлення у загальному випадку працює наступним чином: програма під час виконання зберігає свій стан, у випадку відмови припиняє виконання, далі програма запускається заново, їй надається останній стан, програма продовжує своє виконання. Конкретні алгоритми відрізняються місцем зберігання станів та періодичністю бекапів.

Чим більше різних пристроїв зберігає стан програми, тим довше та складніше оновлювати його, але тим менше ризик повної втрати даних (якщо немає виділеного бекап серверу), та потенційно менший час відновлення (адже можна з декількох пристроїв обрати найближчий, з якого швидше завантажиться стан).

Чим менше період бекапів, тим менше даних втрачаються у разі відмови. У разі зберігання стану у реальному часі дані не втрачаються взагалі. У невеликих системах із невеликим об'ємом даних бекап у реальному часі досить нескладно зробити. Наприклад, у хмарному застосуванні редагування текстових документів Google documents кожна маніпуляція з текстом одразу потрапляє у хмарне сховище, тому будь-які відмови на клієнтському пристрої не пошкодять дані, а відкрити той самий документ можливо швидко на іншому пристрої. Але у випадку завантажених сервісів, такі як соціальні мережі, потік нових даних може бути занадто великий для негайного зберігання у декількох сховищах, тому розробникам та адміністраторам необхідно підбирати баланс між частотою бекапів, аби і клієнт не втратив занадто багато своїх повідомлень/фотографій/відеозаписів, і датацентри не були постійно стовідсотково зайняті копіюванням існуючих даних.

### Структурні елементи вирішення проблем самовідновлення

Для реалізації ефективного самовідновлення система повинна мати відповідні компоненти та властивості. Наведемо елементи, які зазвичай можуть не реалізуватися у традиційних програмних або апаратних комплексах, не здатних до самовідновлення.

**1. Спостерігач.** У системі необхідний програмний компонент або пристрій, який буде займатися моніторингом інших програм та пристроїв комп'ютерної системи, та у разі відмови ініціювати відновлення і передавати останній бекап. Спостерігач повинен завжди бути активним, тож у однорівневих системах, коли усі пристрої однаково під загрозою відмови, постає питання, скільки пристроїв мають бути спостерігачами, як передаватимуться повноваження спостерігача після його відмови, та яку архітектуру матиме така система.

**2. Прогнозування.** Прогнозування відмови дозволятиме готувати актуальний бекап та мінімізувати втрату даних. Але у загальному випадку прогнозувати відмову неможливо, тож алгоритми розробляються для конкретних випадків (синоптики прогнозують маршрут тайфуна, радарні системи буду-

ють траєкторію ворожої ракети, операційна система фіксує аномальне зростання пам'яті процесу, тощо).

**3. Діагностика** причин відмови. З'ясування факторів, що призвели до відмови. Спрощує попередження аналогічних відмов. У програмних системах часто недооцінена проблема, адже після відмови програми у більшості випадків файл із подробицями містить хаотичну інформацію, яка не допоможе розробнику знайти причину відмови.

**4. Самовідновлення** у реальному часі. Інколи, наприклад, у системах відеоспостереження, відновлення повинно відбуватися якомога швидше, тому оптимізувати необхідно і завантаження бекапу, і час старту програми, або взагалі, програма вже повинна бути запущена заздалегідь до відмови.

**5. Корегування.** Після відмови доречно виправити помилки, що призвели до відмови, та підготувати систему до наступної або запобігти аналогічним відмовам. Традиційні програми не можуть самі себе виправити та перезібрати, проте існують напрямки реалізації цих можливостей [16].

**6. Виявлення порушення.** У деяких випадках, наприклад, втручання злочинця у роботу програми, застосування продовжує роботу без відмови. Щоби виявити втручання недостатньо чекати виключень чи сигналів операційної системи, а потрібно активно перевіряти дані додатку та дії користувачів. Якщо злочинець працює акуратно та з мінімальним втручанням, помітити втручання складно, що може потребувати нетривіальних алгоритмів виявлення таких подій (наприклад, засобами машинного навчання).

На основі наведених структурних елементів, які пропонуються реалізовувати у комп'ютерних системах, можливе створення шаблонів програмування [17, 18], за якими будуть реалізовуватися програмні об'єкти підтримки процесів самовідновлення.

### Висновки

Самовідновлення є корисною властивістю, необхідною для побудови надійних та простих у супроводі програмних та апаратних систем. Розробники зараз застосовують алгоритми самовідновлення для вирішення деяких проблем для збільшення надійності комп'ютерних систем. Актуальним напрямом наукової праці є формалізований опис процесів відмови та виправлення наслідків відмови окремих компонентів системи, розробка узагальненої моделі та методів самовідновлення, які можна застосувати для більшості програмних та апаратних розробок. Перспективним напрямом практичної діяльності є створення архітектури та її імплементація у сервісі самовідновлення або компоненті, що вирішуватиме задачу самовідновлення.

В роботі оглянута тематична література предметної області самовідновлення в комп'ютерних системах. Класифіковані типові відмови у комп'ютерних системах, класифіковані деякі методи самовідновлення, описані види відновлення із застосуванням бекапів, сформульовані перспективні задачі управління комп'ютерними системами із самовідновленням. Незважаючи на існуючі приклади реаліза-

ції принципів самовідновлення у комп'ютерних системах, самовідновлення у вигляді окремих сервісів чи компонентів є новим напрямком досліджень. Результати можуть набути чималого поширення та застосовуватись у розробці більшості програм та пристроїв, інформаційних систем з метою спрощення проектування, налагодження та експлуатації сучасних комп'ютерних систем.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rodosek, Gabi & Geihs, Kurt & Schmeck, Hartmut & Stiller, Burkhard. (2009). Self-Healing Systems: Foundations and Challenges. Self-healing systems — survey and synthesis
2. Ghosh, Debanjan & Sharman, Raj & Rao, Raghav & Upadhyaya, Shambhu. (2007). Self-healing systems — survey and synthesis. *Decision Support Systems*. 42. 2164-2185. 10.1016/j.dss.2006.06.011.
3. Dashofy, Eric & van der Hoek, Andre & Taylor, Richard. (2002). Towards Architecture-based Self-Healing Systems. *Proceedings of the first ACM SIGSOFT Workshop on Self-Healing Systems (WOSS'02)*. 21-26. 10.1145/582128.582133.
4. Blair, Gordon & Coulson, Geoff & Blair, Lynne & Duran-Limon, Hector & Grace, Paul & Silva Moreira, Rui & Parlavantzas, Nikos. (2002). Reflection, Self-Awareness and Self-Healing in OpenORB. *Proceedings of the first ACM SIGSOFT Workshop on Self-Healing Systems (WOSS'02)*. 9-14. 10.1145/582128.582131.
5. Nikolic, J., Jubaturov, N., Pournaras, E. Self-Healing Dilemmas in Distributed Systems: Fault Correction vs. Fault Tolerance. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2021, 18(3),9466159, с. 2728-2741
6. Cai, S., Xie, Y., Zou, Y., Wu, H., Shen, L. A Consensus-based Decentralized Algorithm for Service Restoration in Active Distribution Networks. *Chinese Control Conference, CCC, 2021-July*, с. 6778-6783
7. Pozo, F., Rodriguez-Navas, G., Hansson, H. Self-Healing Protocol: Repairing Schedules Online after Link Failures in Time-Triggered Networks. *Proceedings - 51st Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, DSN 2021*, с. 129-140
8. Chu, T., Wang, T., Cao, C., Huang, W., Wang, Y. Self-healing Control Method in Abnormal State of Distribution Network. *Proceedings - 2020 Chinese Automation Congress, CAC 2020*, 9326736, с. 6438-6443
9. Shefer O.V., Alnaeri Frhat Ali. Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer. *Electronics and Control Systems*. 2020. No. 4(66). P.45-50. DOI: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.66.15254>
10. Кучук, Н., Шефер, О., Чернева, Г., & Алнаері, Ф. А. (2021). Визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі. *Сучасні інформаційні системи*, 5(2), 114–119. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>
11. Fang, Shuguang, Dong, Yuning and Shi, Haixian (2012), "Approximate Modeling of Wireless Channel Based on Service Process Burstiness", *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*; Athens: 1-7. Athens: The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing, (WorldComp).
12. Sobieraj, M., Stasiak, M. and Weissenberg, J. (2012), "Analytical model of the single threshold mechanism with hysteresis for multi-service networks", *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E95.B No. 1, pp. 120–132.
13. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I.E., Svyrydov, A. and Kharchenko, V. (2019), "Improving Big Data Centers Energy Efficiency: Traffic Based Model and Method", In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (eds) *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Springer, Cham, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8).
14. Lynch, J., Ashok Joshi, D. Towards Practical Self-Healing Distributed Databases. *IEEE Infrastructure Conference 2020, IEEE Infra 2020*, 9377621
15. Волк М.А. Журнализация состояний программных распределенных моделей и ее использование в оптимистических алгоритмах синхронизации. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2010, випуск 1 (23). С.104–107.
16. Рубан І.В., Волк М.О., Рісухін М.В. Метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2019. № 3 (64), с. 17-23
17. Dias, J.P., Sousa, T.B., Restivo, A., Ferreira, H.S. A Pattern-Language for Self-Healing Internet-of-Things Systems. *Proceedings of the European Conference on Pattern Languages of Programs 2020* July 2020 Article No.: 25, Pages 1–17, <https://doi.org/10.1145/3424771.3424804>
18. Fardin Abdi, Rohan Tabish, Matthias Rungger, Majid Zamani, and Marco Caccamo. 2017. Application and system-level software fault tolerance through full system restarts. In *2017 ACM/IEEE 8th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCCPS)*. IEEE, 197--206.

Received (Надійшла) 11.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.03.2022

**Self-healing computer systems**

Maksym Volk, Oleksii Lunichkin

**Abstract.** One of the properties of modern computer systems is providing robust uninterrupted worktime, which can be implemented in different ways, including system internal solutions. Article **subject** is computer system self-healing problem overview. The **goal** of this article is creating classification baseline for potential faults, backup processes and self-healing challenges in computer systems. **Results.** Subject sources were analyzed. Proposed fault classification, described different ways of restoring systems using backups, defined potential challenges in controlling self-healing computer systems. Despite the existing examples of the implementation of the principles of self-healing in computer systems, self-healing in the form of individual services or components is a new area of research. The results can be widely disseminated and used in the development of most programs and devices, information systems to simplify the design, commissioning and operation of modern computer systems.

**Keywords:** computer system, self-healing, fault, backup.

С. Ю. Гавриленко, В. Д. Зозуля

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ НА ЕТАПІ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ

**Анотація.** Предметом дослідження є методи та засоби виявлення аномалій в даних. Метою статті є підвищення якості класифікації даних за рахунок виявлення аномалій на етапі їх попередньої обробки. **Завдання:** дослідити методи виявлення аномалій на етапі попередньої обробки даних, визначити поріг прийняття рішень *anomaly\_score* для кожного із методів та оцінити якість класифікації до та після *preprocessing*. Використовуваними методами є: методи штучного інтелекту, машинного навчання, ансамблеві методи. Отримано такі результати: досліджено методи виявлення аномалій: метод стандартного відхилення (*Standard Deviation Method*), метод локального рівня викидів (*Local Outlier Factor*), метод Ізолюючого лісу (*Isolation Forest*). Отримано залежність кількості аномалій від порогу прийняття рішень для кожного із методів. Оцінку якості попередньої обробки даних виконано з використанням класифікаторів на основі методів *KNN* та беггінгу (*Bagging*). Досліджені методи реалізовані програмно з використанням хмарного сервісу *GOOGLE COLAB* на основі *Jupyter Notebook*. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає у дослідженні методів виявлення аномалій на етапі попередньої обробки даних, вибору мета-алгоритму *preprocessing* та визначення оптимальних параметрів його налаштування.

**Ключові слова:** попередня обробка даних, машинне навчання, *preprocessing*, *Standard Deviation Method*, *Local Outlier Factor*, *Random Forest*, *KNN*, *Bagging*.

### Вступ

Попередня обробка даних (*preprocessing*) – це набір процедур які направлені на підвищення якості самих даних та якості інтелектуального аналізу даних. Вона є основою достовірного аналізу даних, які, зазвичай, мають низьку якість, визначається як не тривіальне завдання в аналізі даних і може становити до 80% загального обсягу зусиль з їх інтелектуального аналізу [1]. Якщо обробка даних не буде виконана, то подальший аналіз в більшості випадків неможливий з-за того, що аналітичні алгоритми просто не можуть працювати і результати їх роботи будуть некоректними. Іншими словами, реалізується принцип *GIGO - garbage in, garbage out* ( сміття на вході, сміття на виході).

В цілому, попередня обробка даних складається з п'яти основних завдань: очищення, скорочення, масштабування, перетворення та секціонування даних. Одним із важливих завдань очищення даних є виявлення аномалій.

**Об'єктом дослідження** є процес виявлення аномалій в даних.

**Предметом дослідження** є методи виявлення аномалій в вихідних даних .

**Постановка проблеми та огляд наукових публікацій.** Виявлення аномалій (викидів) – це процес розпізнання під час інтелектуального аналізу даних рідкісних даних, подій або спостережень, які викликають підозри, зважаючи на істотні відмінності від більшої частини даних [1]. Виявлення аномалій містить два напрямки: детектування викидів (*Outlier Detection*) і детектування «новизни» (*Novelty Detection*). Новизна, як правило, з'являється в результаті принципово нової поведінки об'єкта (*sample*) або екземпляру (*example*), наприклад, після проникнення вірусів в комп'ютерну систему. Пошук аномалій може бути як кінцевою метою аналізу та побудови моделей, так і проміжним етапом підготовки. На етапі попередньої обробки даних вирішується

завдання детектування викидів та шумів. Шум (*noise*) – це викид «в слабкому сенсі», який розмиває кордони класу (кластера) та заважає чітко розгледіти картину.

У класичній постановці задача детектування аномалій сформулюється так. Нехай дані мають ознакове подання, тобто кожен об'єкт  $x$  заданий у вигляді деякого вектору з  $\mathbf{R}^d$ . Необхідно у заданій множині  $X$  для кожного елемента видати 0, якщо цей об'єкт відноситься до класу нормальних даних, і 1 якщо цей об'єкт є аномальним. Таке завдання відноситься до класу завдань навчання без вчителя, оскільки правильних відповідей на частини вхідних даних не надається. Методи навчання без вчителя [2, 3] широко застосовуються для виявлення аномалій у випадках, коли аномалії рідкісні або аномальна вибірка нерепрезентативна, тобто не покриває всіх можливих випадків аномальної поведінки. Вона показують гарну якість у випадках, коли класи не перетинаються або перетин незначний.

В аналогічному завданні навчання з учителем на деякій частині  $X_{train}$  дані є розміченими, тобто для кожного об'єкта  $x \in X_{train}$  відомі мітки  $y(x) \in \{0, 1\}$  – чи є об'єкт аномалією. Завдання визначення міток для нових даних  $X_{test}$ , формально, є завданням бінарної класифікації, отже, може вирішуватися за допомогою будь-яких алгоритмів машинного навчання з учителем. Такий підхід є якісним за умови відносно частих аномалій [4-6], бінарна класифікація нестійка до малих чи нерепрезентативним вибірках аномалій.

Однак, можливий і «промійний варіант», а саме розпізнавання частково з учителем коли всі мітки  $y(x)$ ,  $x \in X_{train}$  дорівнюють 0, тобто задані приклади лише нормальних («перевірених», «хороших») даних. Навчившись на одному класі, система може визначати приналежність нових даних до нього, таким чином, визначаючи протилежний клас [7]. Практично всі алгоритми детектування аномалій зводяться до побудови деякої функції *anomaly\_score* ( $x$ ), яка є відхилення від норми, оцінкою ступеня ймовірності

того, що екземпляр є аномальним. Після цього поділ на клас аномалій і клас нормальних даних проводиться бінарizaцією за деяким порогом, вибір якого є особливим етапом вирішення задачі. У відсутності міток або апріорної інформації, єдиною наявною інформацією є одновимірний розподіл значень *anomaly\_score* на наявних даних, чого для обґрунтованого вибору недостатньо. Найчастіше, відома приблизна частка аномалій в даних; в таких випадках поріг вибирається відповідно квантилю.

Іншим важливим завданням контролю якості даних є аналіз аномалій, тобто визначення джерел аномалій [8]. За способом реалізації виділяють наступні технології виявлення аномалій: класифікація, кластеризація, статистичний аналіз, спектральні методи, гібридні методи. Вищенаведені технології використовують алгоритми на основі ймовірнісного, лінійного та метричного підходів.

До поширених методів розпізнавання можна віднести наступні: метод опорних векторів (*Support Vector Machine, SVM*) [9], ізоляційний ліс (*Isolation Forest, IF*) [8], метод *k* найближчих сусідів (*k-Nearest Neighbors Detector, KNN*) [10]; метод *k*-середніх (*Average KNN, AKNN*), кластерний метод (*Cluster-based Local Outlier Factor, CLOF*) [11, 12], *DBSCAN* [13, 14] та ін. Ефективність різних методів залежить від даних та параметрів і має слабкі систематичні переваги один перед іншими, якщо порівнювати за багатьма наборами даних та параметрів [15,16]. Окрім цього методи виявлення аномалій чутливі до параметрів налаштування моделей.

**Дослідження методів виявлення аномалій**

Дослідження було виконано з використанням хмарного сервісу *GOOGLE COLAB* на основі *Jupyter Notebook*.

У якості вихідних даних використано програмно згенеровані файли формату \*.csv. В рамках дослідження використано розмічені дані, які визначають приналежність до одного із двох класів.

Розмітка даних використовується лише для оцінки якості класифікації. Подальші дослідження базуються на використанні методів ідентифікації аномалій без вчителя.

Розглянуто такі методи: метод стандартного відхилення (*Standard Deviation Method*), метод локального рівня викидів (*Local Outlier Factor*), метод Ізолюючого лісу (*Isolation Forest*).

Досліджено залежність абсолютної кількості аномалій від порогу прийняття рішень для кожного із методів. Прийняття рішення щодо віднесення об'єкту до аномалій відбувалося за двома алгоритмами: *Entire* та *Each*. Відповідно до алгоритму *Entire*, аномальність об'єкту оцінювалась для обох класів одночасно. Відповідно до алгоритму *Each*, аномальність об'єкту оцінювалась окремо по кожному із класів.

Оцінку якості попередньої обробки даних виконано з використанням класифікаторів на основі методу *KNN* та беггінгу (*Bagging*) зі стандартним налаштуванням на розмічених даних. При цьому точність класифікації до попередньої обробки є наступною: для методу *KNN* – **82,3%**, для беггінгу (*Bagging*) – **83,3**.

Основою методу стандартного відхилення є розрахунок середніх значень ряду

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i,$$

та середньоквадратичного відхилення

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2},$$

де *N*– кількість елементів, *x<sub>i</sub>* – *i*-й елемент екземпляру.

Поріг визначення аномалій, зазвичай, визначається як

$$anomaly\_score = x_i \pm 2\sigma.$$

Результати дослідження методу стандартного відхилення (*Standard Deviation Method*) для виявлення аномалій в вихідних даних наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати виявлення аномалій в даних методом стандартного відхилення

Стандартне відхилення	Кількість аномалій, алгоритм <i>Entire</i>	Кількість аномалій, алгоритм <i>Each</i>	Точність класифікації, після preprocessing, метод <i>KNN</i>		Точність класифікації, після preprocessing, метод <i>Bagging</i>	
			алгоритм <i>Entire</i>	алгоритм <i>Each</i>	алгоритм <i>Entire</i>	алгоритм <i>Each</i>
<b>3,5</b>	1	1	93,33	93,33	90,3	91,21
<b>3,25</b>	1	4	93,33	93,33	90,3	91,82
<b>3</b>	2	5	93,33	93,33	89,7	90,61
<b>2,75</b>	4	9	93,33	93,33	<b>92,12</b>	90
<b>2,5</b>	10	16	93,33	93,33	89,7	90,61
<b>2,25</b>	<b>18</b>	<b>29</b>	<b>93,33</b>	<b>93,64</b>	90,61	92,12
<b>2</b>	36	51	93,33	93,64	90	91,82
<b>1,75</b>	72	91	93,64	93,33	91,21	<b>93,33</b>
<b>1,5</b>	153	152	93,03	92,42	91,82	91,82
<b>1,25</b>	263	253	92,42	93,33	90,3	92,12
<b>1</b>	390	371	93,64	93,03	82,42	92,12
<b>0,75</b>	515	483	93,03	93,03	53,64	92,12
<b>0,5</b>	601	584	92,12	93,03	80,91	92,12

Відповідно до результатів, поріг аномалій може бути визначено наступним чином: Для методу *KNN* як

$$anomaly\_score = x_i \pm 2,25\sigma .$$

Для методу беггінгу та алгоритму *Entire*, як

$$anomaly\_score = x_i \pm 2,75\sigma .$$

Для методу беггінгу та алгоритму *Each*, як

$$anomaly\_score = x_i \pm 1,75\sigma .$$

Попередня обробка даних з метою вилучення аномалій в даних методом стандартного відхилення надала можливість підвищити точність класифікації для методу *KNN* – до 11,3%, для беггінгу – до 10%.

При цьому, ідентифікація аномалій обома алгоритмами суттєво не вплинула на якість ідентифікації для методу *KNN*, та надала можливість підвищити точність класифікації до 1,2% для методу беггінгу та алгоритму *Each*.

Алгоритм *Local Outlier Factor (LOF)* – це метод неконтрольованого виявлення аномалій. *LOF* використовує ідею порівняння локальної щільності точки із середньою локальною щільністю її *k*-найближчих сусідів. Він вважає, що аномалії – це об'єкти, які знаходяться в областях з низькою щільністю або низькою локальною щільністю, чим їх сусіди [11]. Алгоритм є якісним у ситуаціях, коли щільність даних не однакова у всьому наборі даних і показує хороші результати при виявленні локальних викидів, однак має високу обчислювальну складність.

Відповідно до результатів, поріг аномалій може бути визначено наступним чином.:

Для методу *KNN* як

$$anomaly\_score = x_i \pm 2,25\sigma .$$

Для методу беггінгу та алгоритму *Entire*, як

$$anomaly\_score = x_i \pm 2,75\sigma .$$

Для методу беггінгу та алгоритму *Each*, як

$$anomaly\_score = x_i \pm 1,75\sigma .$$

Попередня обробка даних з метою вилучення аномалій в даних методом стандартного відхилення надала можливість підвищити точність класифікації для методу *KNN* – до 11,3%, для беггінгу – до 10%.

При цьому, ідентифікація аномалій обома алгоритмами суттєво не вплинула на якість ідентифікації для методу *KNN*, та надала можливість підвищити точність класифікації до 1,2% для методу беггінгу та алгоритму *Each*.

Алгоритм *Local Outlier Factor (LOF)* – це метод неконтрольованого виявлення аномалій. *LOF* використовує ідею порівняння локальної щільності точки із середньою локальною щільністю її *k*-найближчих сусідів. Він вважає, що аномалії – це об'єкти, які знаходяться в областях з низькою щільністю або низькою локальною щільністю, чим їх сусіди [11]. Алгоритм є якісним у ситуаціях, коли щільність даних не однакова у всьому наборі даних і показує хороші результати при виявленні локальних викидів, однак має високу обчислювальну складність.

*LOF* заснований на методі найближчих сусідів (*kNN*) і описаний у роботі [12]. Досяжність точки *x* щодо точки *y* визначається так

$$R_k(x, y) = \max(p(x, y), D_k(y)) , \quad (1)$$

де  $D_k(y)$  – відстань від точки *y* до *k* найближчого сусіда.

Тоді оцінку *LOF* визначається як

$$LOF_k(x, y) = \frac{mean_{y \in N_k(x)} AR_k(x)}{AR_k(y)} ,$$

де  $AR_k(x)$  – середня досяжність точки даних *x* щодо *k* своїх найближчих сусідів,  $AR_k(y)$  – множина *k* найближчих сусідів точки даних *x*. Якщо *LOF* приймає значення, близькі до 1, тоді об'єкт *x* буде вважатися нормальним, однак якщо  $LOF \gg 1$ , у такому разі досліджуваний об'єкт визнається аномалією. *LOF* визначає аномалію з урахуванням щільності даної області.

Результати дослідження виявлення аномалій в вихідних даних методом *LOF* наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати виявлення аномалій в даних методом *Local Outlier Factor*

Кількість класифікаторів (кластерів)	Кількість аномалій, алгоритм <i>Entire</i>	Кількість аномалій, алгоритм <i>Each</i>	Точність класифікації, після preprocessing, метод <i>KNN</i>		Точність класифікації, після preprocessing, метод <i>Bagging</i>	
			алгоритм <i>Entire</i>	алгоритм <i>Each</i>	алгоритм <i>Entire</i>	алгоритм <i>Each</i>
<b>1</b>	148	153	93,03	92,73	89,7	91,21
<b>5</b>	17	31	<b>93,64</b>	<b>93,64</b>	89,7	91,52
<b>10</b>	11	27	93,33	93,64	89,39	<b>90,91</b>
<b>15</b>	12	29	93,33	93,64	<b>90,91</b>	90,3
<b>20</b>	15	29	93,33	93,33	91,21	90,61
<b>25</b>	18	29	93,33	93,33	91,21	91,82
<b>30</b>	18	29	93,33	93,33	91,21	91,82
<b>35</b>	20	30	93,33	93,33	90,61	91,21
<b>40</b>	20	29	93,33	93,33	90,61	90
<b>45</b>	20	30	93,33	93,64	90,61	91,82
<b>50</b>	19	30	93,33	93,64	91,52	89,39
<b>100</b>	17	24	93,33	93,64	90,3	92,42

Отримані результати дозволили підібрати оптимальну кількість сусідів на етапі попередньої обробки даних

Так для методу *KNN* оптимальним є п'ять сусідів для обох алгоритмів. Для методу беггінгу та алгоритму *Entire* оптимальним є 35 сусідів, алгоритму *Each* – 10 сусідів.

Вилучення аномалій на етапі попередньої обробки даних методом *LOF* надало можливість підвищити точність класифікації для методу *KNN* – до 11,3%, для беггінгу – до 7,6%. При цьому, ідентифікація аномалій обома алгоритмами суттєво не вплинула на якість ідентифікації для методу *KNN*, та беггінгу.

Метод ізоляційного лісу (*Isolation Forest*) [9, 17] є технікою машинного навчання без вчителя, заснованою на принципі Монте-Карло.

Метод поєднує дерева прийняття рішень [14], використовуючи евристики, пов'язані з навчанням дерев прийняття рішень.

Робота алгоритму полягає у побудові випадкового бінарного дерева, в якому корінь – весь простір ознак, а вузол представлений випадковою ознакою та порогом розбиття.

Поріг розбиття вибирається з рівномірного розподілу на відрізьку від мінімального до максималь

ного значення обраної ознаки. При тотожному збігу об'єктів у вузлі робота алгоритму завершується.

Глибина листя в дереві буде відповідати значенню алгоритму *anomaly\_score*.

Оцінка аномалії об'єкту  $x$  визначається як [9]:

$$anomaly\_score(x, n) = 2 \frac{E(h(x))}{c(n)},$$

де  $c(n)$  визначається таким чином:

$$c(n) = 2H(n-1) - (2(n-1)/n),$$

$H(i)$  визначається як:

$$H(i) = \ln(i) + \gamma.$$

$h(x)$  – довжина шляху до спостереження  $x$ ,  $c(n)$  – середня довжина шляху безуспішного пошуку у двійковому дереві пошуку, а  $n$  – кількість точок даних.

Якщо  $s$  набуває значення, близькі до 1, тоді об'єкт  $x$  з великою ймовірністю буде аномалією, однак якщо  $s$  приймає значення менше 0.5, то досліджуванний об'єкт визнається нормальним. *Isolation Forest* чутливий лише до глобальних викидів та слабо справляється з локальними викидами.

Результати дослідження наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати виявлення аномалій в даних методом *Isolation Forest*

Кількість класифікаторів (дерев рішень) ансамблю	Кількість аномалій, алгоритм <i>Entire</i>	Кількість аномалій, алгоритм <i>Each</i>	Точність класифікації, після препоцесінгу, метод <i>KNN</i>		Точність класифікації, після препоцесінгу, метод <i>Bagging</i>	
			Алгоритм <i>Entire</i>	алгоритм <i>Each</i>	Алгоритм <i>Entire</i>	алгоритм <i>Each</i>
1	313	173	93,33	92,42	88,79	90,61
5	256	139	<b>93,64</b>	92,12	88,79	93,03
10	228	135	93,33	92,12	89,7	92,12
20	177	139	93,33	92,12	90	93,33
50	152	123	93,64	92,73	90	93,03
100	130	115	93,64	92,42	92,12	<b>93,64</b>
150	135	112	93,64	<b>92,73</b>	91,52	92,42
200	135	109	93,64	92,73	91,52	92,73
300	135	109	93,33	92,73	<b>92,12</b>	92,12
500	142	115	92,42	93,03	90,61	92,73

Отримані результати дозволили підібрати оптимальну кількість класифікаторів ансамблю на основі алгоритму *Isolation Forest*, які забезпечують найбільшу точність класифікаторів. Отримано, що на етапі попередньої обробки даних на основі алгоритму *Isolation Forest* для методу *KNN* оптимальним є використання 50 класифікаторів для обох алгоритмів, а для беггінгу оптимальним є використання 100 дерев рішень для обох алгоритмів. Попередня обробка даних методом *Isolation Forest* надала можливість підвищити точність класифікації для методу *KNN* – до 11,4%, для беггінгу – до 11,3%.

### Висновки

У роботі розглянуто методи попередньої обробки даних.

Досліджено методи:

стандартного відхилення (*Standard Deviation Method*),

локального рівня викидів (*Local Outlier Factor*), ізолюючого лісу (*Isolation Forest*) для виявлення аномалій в даних.

Для кожного із методів отримано залежність абсолютної кількості аномалій від порогу прийняття рішень. Крім того, оцінка прийняття рішення щодо віднесення об'єкту до аномалій відбувалося за двома алгоритмами.

Відповідно до першого алгоритму, за наявності нерозмічених даних, аномальність об'єкту оцінювалась для обох класів одночасно. Відповідно до другого алгоритму, за наявності розмічених даних аномальність об'єкту оцінювалась окремо за кожним із

класів. Отримано, що попередня обробка даних з метою вилучення аномалій в даних методом стандартного відхилення надала можливість підвищити точність класифікації для методу *KNN* – до 11,3%, для беггінгу – до 10%. Вилучення аномалій на етапі попередньої обробки даних методом *LOF* дозволило підвищити точність класифікації для методу *KNN* – до 11,3%, для беггінгу – до 7,6%.

Більш якісним виявився алгоритм попередньої обробки даних *Isolation Forest*. Тестування показало збільшення точності класифікації для методу *KNN* – до 11,4%, для беггінгу – до 11,3%. При цьому, для

методу *KNN* оптимальним є використання 50 дерев рішень для обох алгоритмів, а для беггінгу оптимальним є використання 100 дерев рішень для обох алгоритмів.

Досліджені методи реалізовані програмно з використанням хмарного сервісу *GOOGLE COLAB* на основі *Jupyter Notebook*

Проведені експерименти підтвердили працездатність методу *Isolation Forest*., що надає можливість рекомендувати його для практичного використання на етапі попередньої обробки даних з метою підвищення їх точності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cui Z. G., Cao Y. Wu, Liu H.N, Qiu, Z. F., Chen, C. W. Research on preprocessing technology of building energy consumption monitoring data based on machine learning algorithm. *Build. Sci.* 2018, Vol. 34 (2), С. 94–99.
2. Bernhard Schölkopf, Robert C Williamson, Alex J Smola et al. Support vector method for novelty detection *Advances in Neural Information Processing Systems*, Denver, United States, 2000, P. 582–588.
3. Zhou Chong, Paffenroth Randy C. Anomaly detection with robust deep autoencoders, *ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Halifax, Canada*, 2017, P. 665–674.
4. Adrian Alan Pol, Gianluca Cerminara, Cécile Germain et al. Detector monitoring with artificial neural networks at the CMS experiment at the CERN Large Hadron Collider. *Computing and Software for Big Science*. 2019, Vol. 3 (1), P. 3-8.
5. Stankevicius Mantas, Marcinkevicius Virginijus, Rapsevicius Valdas. Comparison of Supervised Machine Learning Techniques for *CERN CMS Of49 fline Data Certification*. *Doctoral Consortium/Forum@ DB&IS*, 2018, P. 170–176.,
6. Adrian Alan Pol, Virginia Azzolini, Gianluca Cerminara et al. Anomaly detection using Deep Autoencoders for the assessment of the quality of the data acquired by the CMS experiment, *EPJ Web of Conferences, EDP Sciences*, 2019, Vol. 214, P. 5.
7. Maxim Borisyak, Artem Ryzhikov, Andrey Ustyuzhanin et al. (1 + epsilon)-class Classification: an Anomaly Detection Method for Highly Imbalanced or Incomplete Data Sets, *Journal of Machine Learning Research*, 2020, Vol. 21(72), P. 1–22.
8. Гавриленко С.Ю., Швердін І. В. Розробка методу ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі алгоритму «*Isolation Forest*», *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, 2021, №.1(56), P. 105-116.
9. Support vector method for novelty detection / Bernhard Schölkopf, Robert C Williamson, Alex J Smola et al., *Advances in Neural Information Processing System, Denver, United States*, 2000, P. 582–588.
10. Большаков А.С., Губанкова Е.В. Обнаружение аномалий в компьютерных сетях с использованием методов машинного обучения, *Телекоммуникационные устройства и системы*, 2020. Т. 10. № 1. С. 37-42.
11. Breunig M. M. et al. *LOF: identifying density-based local outliers*, *ACM sigmodrecord – ACM*, 2000, Vol. 29 (2), P. 93-104.
12. Breunig, M. M. , Kriegel, H.P., Ng, R.T. , Сандер, Дж.. *LOF: определение локальных выбросов на основе плотности.*, *Материалы Международной конференции ACM SIGMOD 2000 г. по управлению данными. SIGMOD*, 2000, С. 93–104.
13. Zhou, H., Wang, P., & Li, H. Research on adaptive parameter determination in DBSCAN algorithm, *Journal of Xi'an University of Technology*, 2014, 28(3), P.289-292.
14. Karami A., Johansson R. Choosing DBSCAN parameters automatically using differential evolution, *International Journal of Computer Applications*, 2014, Vol. 91(7), P.1-11.
15. Arthur Zimek, Erich Schubert. Outlier Detection. Encyclopedia of Database Systems, *Springer*, New York, 2017. P.96-106.
16. Dai, Zhifeng and Xiaomin Chang. Predicting Stock Return with Economic Constraint: Can Interquartile Range Truncate the Outliers, *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, P. 1-12.
17. Liu, Fei Tony, Ting, Kai Ming and Zhou, Zhi-Hua. Isolation forest, *Proceedings of the 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, December 2008*, P. 413–422.

Надійшла (received) 16.12.2021

Прийнято до друку (accepted for publication) 26.01.2022

### Investigation of methods for detecting anomalies at the stage of data pre-processing

S. Gavrylenko, V. Zozulia

**Abstract.** The subject of the research is the methods and means of detecting anomalies in data. **The purpose** of the article is to improve the quality of data classification by detecting anomalies at the pre-processing stage. **Task:** to investigate methods for detecting anomalies at the stage of data preprocessing, to determine the decision threshold for each of the methods and to evaluate the quality of classification before and after preprocessing. **Methods used are:** artificial intelligence methods, machine learning, ensemble methods. The following **results were obtained:** anomaly detection methods were studied: Standard Deviation Method, Local Outlier Factor method, Isolation Forest method. The dependence of the number of anomalies on the decision threshold for each of the methods is obtained. The evaluation of the quality of data preprocessing was performed using classifiers based on the *KNN* and Bagging methods. The studied methods are implemented programmatically using the *GOOGLE COLAB* cloud service based on *Jupyter Notebook*. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained lies in the study of anomaly detection methods at the stage of data preprocessing, the choice of a preprocessing meta-algorithm and the determination of its optimal settings.

**Keywords:** data preprocessing, machine learning, preprocessing, Standard Deviation Method, Local Outlier Factor, Random Forest, *KNN*, Bagging.



Д. Ю. Голубничий<sup>1</sup>, О. В. Коломійцев<sup>2</sup>, В. Ф. Третяк<sup>3</sup>, Я. О. Ключка<sup>2</sup>, А. О. Рибальченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет "Харківський політехнічний університет", Харків, Україна

<sup>3</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ОБМІНУ МЕДИЧНИМИ ДАНИМИ ПАЦІЄНТІВ З ЛІКАРЯМИ НА ОСНОВІ ІОТА

**Анотація.** Обмін медичною інформацією дозволяє здійснювати електронне переміщення медичних даних між різними інформаційними системами охорони здоров'я. На відміну від традиційних паперових документів, електронні дозволяють постачальникам медичних послуг отримувати доступ до важливої медичної інформації та обмінюватися нею. Проте, існуючі системи охорони здоров'я для обміну медичними даними громадян, зіткнулися з низкою проблем, зокрема: конфіденційність, безпека та відсутність контролю з боку пацієнтів. Враховуючи все вищесказане, запропоновано використовувати технологію розподіленого реєстру, оскільки вона може кардинально змінити спосіб зберігання медичної інформації, забезпечуючи безпечні способи обміну даними. У статті розглядається технологія розподіленого реєстру для Інтернету речей (Internet Of Things, IoT), яка називається ІОТА. Блокчейн вже використовується в багатьох системах охорони здоров'я, оскільки він вирішує серйозні проблеми охорони здоров'я, що пов'язані з конфіденційністю та безпекою. Однак, залишаються питання, що пов'язані з масштабованістю та продуктивністю блокчейну. ІОТА вирішує ці проблеми, оскільки використовує структуру даних DAG (directed acyclic graph), яка дозволяє додавати транзакції паралельно. Це скорочує час, що потрібний на підтвердження транзакцій, а кількість одночасно оброблюваних транзакцій може бути необмеженою. Протокол Masked Authenticated Messaging (МAM) дозволяє безпечно передавати зашифровані потоки даних як транзакції. Тому, система, що пропонується, використовує ІОТА для безпечного обміну медичними даними. Процес створення та надсилання медичних даних в ІОТА проілюстровано на конкретному прикладі. Розглянуто застосування протоколу МAM на прикладі передачі медичних даних пацієнта лікарю.

**Ключові слова:** спрямований ациклічний граф, обмін медичними даними, технологія розподіленого реєстру, Masked authenticated messaging.

### Вступ

Щороку у сферу охорони здоров'я впроваджуються нові технології для вирішення однієї з найбільших проблем галузі – обмін даними. Обмін медичними даними між інформаційними системами різних медичних закладів покращить якість медичної допомоги громадянам. Однак, медичні установи використовують власні інформаційні системи, які здебільшого не можуть спілкуватися з іншими системами. Відсутність функціональної сумісності знижує якість медичної допомоги громадянам, оскільки медичні працівники не мають доступу до необхідної інформації пацієнта. Функціональна сумісність – це здатність медичних інформаційних систем безпечно обмінюватися електронними медичними даними для покращення здоров'я як окремого пацієнта, так і всього населення в цілому (громадян). Таким чином, для надання якісної медичної допомоги пацієнтам дуже важливо налагодити функціональну сумісність [1 - 2].

Ще однією проблемою охорони здоров'я є фрагментація даних. Дані пацієнтів, зазвичай, зберігаються в різних медичних закладах. Ці численні сховища даних перешкоджають повноцінному обміну та повторному використанню даних, а також обмежують якість медичної допомоги пацієнтам [3]. Крім цього, не так давно, усі медичні дані були збережені на папері. І хоча електронні медичні картки вже замінили паперові, заповнення цих карток відбувається повільно. Крім того, інформація, що міститься у цих медичних картках, часто буває неповною або зовсім відсутня. Отже, незважаючи на те,

що життєво важливі медичні дані стали доступнішими, є ще багато роботи для створення цілісної екосистеми даних [2].

Використання технології розподіленого реєстру, зокрема ІОТА, для безпечного обміну медичними даними викликало неабиякий інтерес. ІОТА – це інноваційний тип технології розподіленого реєстру, який дозволяє безпечно обмінюватися даними та цінностями між користувачами мережі. Тому, важливо проаналізувати використання ІОТА у сфері охорони здоров'я громадян для забезпечення безпечного обміну медичними даними пацієнтів. Оскільки ІОТА можна використовувати для передачі даних пацієнтів між закладами охорони здоров'я. А протокол МAM дозволить передавати потоки зашифрованих медичних даних, які можуть містити як окремі дані пацієнта, так і всю медичну карту [3].

**Літературний огляд.** У цьому розділі наведено детальний огляд літератури, у якому описується застосування технології блокчейн та ІОТА у сфері охорони здоров'я.

У роботі [4] пропонується нова спільна система охорони здоров'я для забезпечення ефективного та широкомасштабного обміну медичними даними пацієнтів (громадян). Метою якої є об'єднання різних медичних закладів в єдину національну систему охорони здоров'я громадян, що забезпечує швидкий, безпечний обмін та зберігання медичних даних пацієнтів. Запропонована система MEdgeChain використовує граничні обчислення та технологію блокчейн для забезпечення безпечної передачі великих обсягів медичних даних пацієнтів, які генеруються різними медичними установами.

Автори роботи [5] також розробили систему EdgeMediChain для безпечного обміну медичними даними пацієнтів. Запропонована архітектура використовує як граничні обчислення, так і блокчейн, щоб полегшити та забезпечити необхідні вимоги до екосистеми охорони здоров'я громадян з точки зору масштабованості, безпеки та конфіденційності даних.

У роботі [6] представлено нову, безпечну і ефективну схему, що заснована на технології блокчейн та шифруванні на основі атрибутів. Запропонована схема MedSBA призначена для запису та зберігання медичних даних пацієнтів. Вона захищає конфіденційність та дозволяє точно контролювати доступ до медичних даних пацієнтів.

У роботі [7] для боротьби з епідемічними захворюваннями пацієнтів використовуються технології IOTA та QR-коду. CoviReader – це децентралізована система управління охороною здоров'я громадян, яка анонімно передає дані пацієнтів. Система побудована на платформі IOTA та надає пацієнтам (користувачам) детальний, незмінний та легкий доступ до їх особистої інформації. Користувачі взаємодіють з IOTA через мобільний додаток.

Також, технологія IOTA, зокрема протокол MAM, використовується в роботі [8] для безпечного обміну даними в системі охорони здоров'я громадян.

Система безпечного обміну даними про рівень глюкози в крові пацієнта була запропонована в роботі [9]. Враховуючи відсутність ідеальної схеми обміну даними між пацієнтом та медичним працівником на основі DLT, автори запропонували два варіанти системи. Один варіант заснований виключно на IOTA, а інший використовує IOTA в поєднанні з приватним кластером IPFS (InterPlanetary File System).

У роботі [10] також пропонується система обміну медичними даними на основі IOTA. Дані генеруються пристроями IoT та передаються за допомогою IOTA. MAM використовується для полегшення обміну даними між різними сторонами.

MedShare [11] – це децентралізована платформа для безпечного обміну електронними медичними записами. Вона використовує розумні контракти для створення надійного середовища, де медичні установи можуть обмінюватися своїми зашифрованими медичними записами.

Обмін медичними даними відіграє вирішальну роль у сучасній сфері охорони здоров'я громадян. Тому, забезпечення безпеки, конфіденційності та цілісності медичних даних пацієнтів є першочерговим пріоритетним завданням.

Таким чином, використання технології розподіленого реєстру, зокрема IOTA, забезпечить надійний обмін даними між медичним працівником та пацієнтом.

**Мета та завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка системи обміну медичними даними між пацієнтами та лікарями, закладами, установами і організаціями системи охорони здоров'я громадян з використанням IOTA.

Для досягнення цієї мети вирішуються наступні завдання:

- здійснення огляду IOTA, а також протоколу передачі даних MAM;
- визначення загальної схеми передачі медичних даних пацієнтів за допомогою IOTA;
- визначення застосовності протоколу MAM для безпечного обміну медичних даних пацієнтів.

### Виклад основного матеріалу

Відомо, що IOTA – це технологія розподіленого реєстру, яка забезпечує безпечний обмін даними між різними пристроями IoT. IOTA використовує DAG замість традиційного блокчейну, який отримав назву Tangle (рис. 1). Завдяки цьому, IOTA вирішує типові задачі блокчейну – комісія за транзакції та масштабованість. Тобто, IOTA не використовує концепцію блоків та майнерів для підтвердження транзакцій. Натомість вузли, що створюють нові транзакції, повинні схвалити дві попередні транзакції [12]. Тому, є можливість здійснювати операції без комісій, що відкриває ще одну важливу особливість Tangle – мікротранзакції. Крім того, мережа IOTA спроектована як легка та енергоефективна. Це дозволяє використовувати IOTA на різноманітних пристроях та комп'ютерах (персональних) з різними висмогами до енергоспоживання.

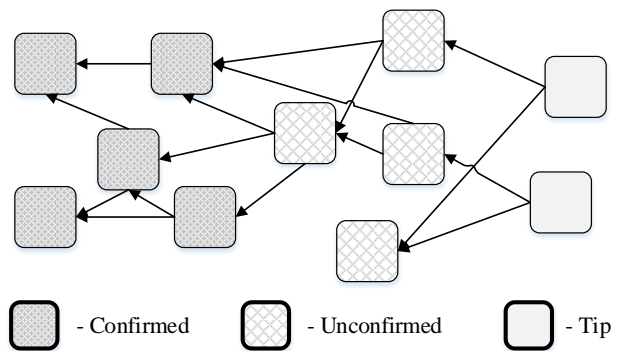


Рис. 1. Tangle

Масштабованість – головна проблема технології блокчейн. У Bitcoin блок видобувається приблизно кожні 10 хвилин з максимальним розміром блоку 1 МБ, що обмежує швидкість транзакцій Bitcoin від 3 до 7 транзакцій в секунду. За умови, якщо транзакції будуть надходити дуже швидко, то блоки додаватимуться повільно. Оскільки усі блоки послідовно з'єднуються один з одним, утворюючи безперервний послідовний ланцюжок блоків. IOTA дозволяє додавати транзакції паралельно, що забезпечує більш швидке підтвердження транзакцій, на відміну від блокчейну [13].

Ще однією ключовою особливістю IOTA є протокол MAM.

MAM – це протокол передачі даних, який дозволяє користувачеві публікувати потоки зашифрованих даних у вигляді транзакцій. Використання MAM є кращим рішенням, ніж просто надсилати транзакції з даними на одну адресу. Для цього, користувач створює канал та транслює на нього повідомлення.

Інші користувачі мережі можуть підписатися на канал, щоб отримувати повідомлення, використовуючи адресу транзакції. Кожна транзакція має вказівник на наступну транзакцію, відому як *next root*, який є коренем дерева Меркла наступної транзакції. Тому, якщо користувач отримав доступ до каналу, він не може переглядати минулі транзакції через пряме зв'язування транзакцій [12 - 14].

Існує три режими конфіденційності (рис. 2): загальнодоступний, обмежений та приватний.

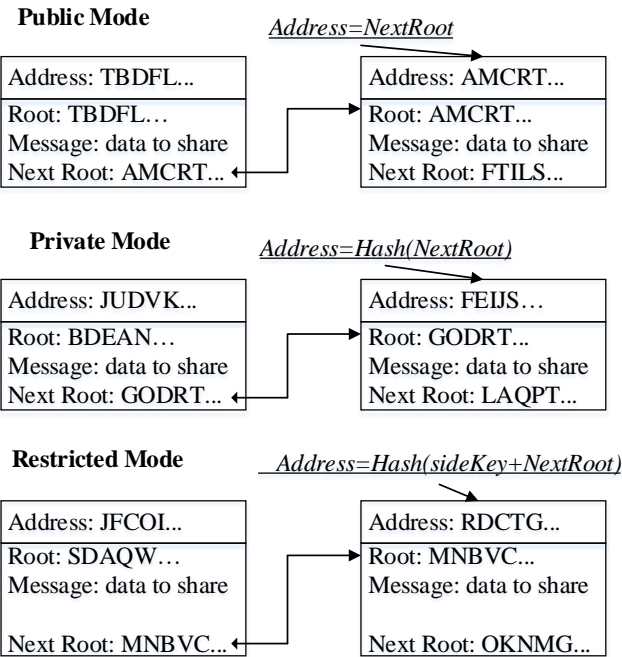


Рис. 2. Режими МАМ

У загальнодоступному режимі *root* (корінь дерева Меркла) використовується як адреса транзакції МАМ, так і ключ каналу. Таким чином, весь вміст ланцюга повідомлень може прочитати будь-хто у мережі. У приватному режимі, у якості адреси використовується хеш кореня ( $address = hash(root)$ ), а повідомлення розшифровується за допомогою *root*, що не дозволяє випадковим користувачам розшифрувати повідомлення, оскільки вони не можуть отримати *root* з хешу. Дана обставина робить потік МАМ доступним для читання лише тим, кому надано *root*. У обмеженому режимі, у якості адреси використовується хеш кореня та *sideKey* ( $address = hash(sideKey + root)$ ). *sideKey* – це ключ авторизації, який використовується для шифрування та дешифрування, що дозволяє розробнику (власнику) каналу у будь-який час скасувати доступ до свого каналу для майбутніх повідомлень [15-16].

*Обмін медичними даними за допомогою Tangle*

Сьогодні отримати медичні дані пацієнта дуже важко. Оскільки дані фрагментовані і розподілені між різними медичними установами та знаходяться у розрізних сховищах. Кожен медичний заклад використовує власну медичну інформаційну систему для обробки та зберігання даних громадян. І здебільшого ці системи не сумісні одна з одною. Це створює ряд труднощів, що пов'язані з отриманням медичної інформації пацієнтів.

Для вирішення даного наукового завдання пропонується створити систему передачі медичних даних пацієнтів із використанням ІОТА.

На рис. 3 представлена система передачі медичних даних пацієнтів за допомогою ІОТА.

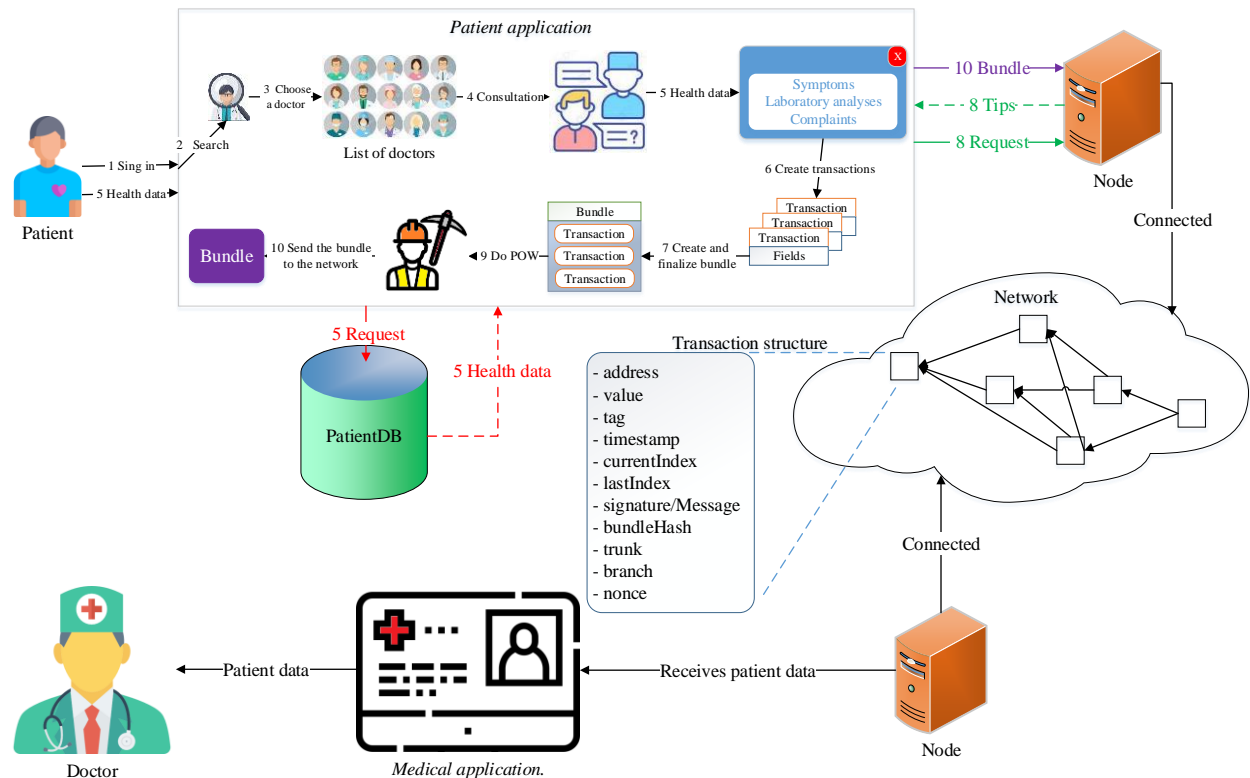


Рис. 3. Архітектура системи обміну медичними даними пацієнтів на основі ІОТА

Перш за все, пацієнт вводить відповідні дані для авторизації. Потім, пацієнт здійснює пошук лікаря за відповідною спеціальністю. З отриманого списку пацієнт обирає лікаря за необхідними критеріями. Обравши лікаря, пацієнт записується на консультацію.

У відповідне вікно пацієнт заносить симптоми захворювання, скарги на стан здоров'я (які його турбують). Пацієнт також може отримати необхідні дані з бази даних. На основі цих даних створюються транзакції, які поміщаються в *bundle*. Наступним

кроком є підтвердження двох непідтверджених транзакцій. Відповідний запит надсилається на вузол, а у відповідь отримуємо хеші необхідних транзакцій. Далі обчислюється POW відповідно до MWM (minimum weight magnitude). І, нарешті, *bundle* транслюється у мережу.

Пацієнт та лікар можуть обмінюватися повідомленнями за допомогою протоколу MAM.

На рис. 4 схематично представлено процес обміну медичними даними пацієнта із лікарем за допомогою MAM.

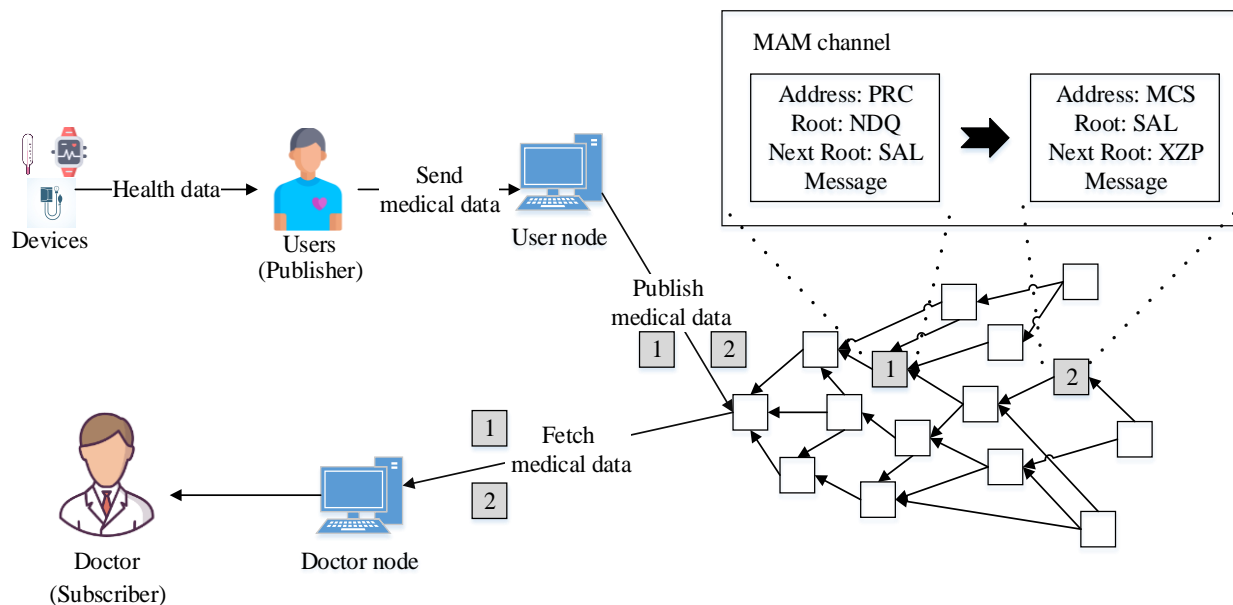


Рис. 4. Процес обміну медичними даними пацієнта із лікарем за допомогою MAM

Пацієнт вводить список скарг на здоров'я, з якими хоче звернутися до лікаря.

Щоб опублікувати ці дані в Tangle, створюється канал MAM.

Оскільки система використовує обмежений режим, генерується ключ авторизації (*sideKey*). Пацієнт формує *bundle* з відповідними транзакціями та відправляє його у мережу.

Постачальники медичних послуг підписуються на канал для перегляду опублікованих даних. Дані потім будуть розшифровані за допомогою ключа авторизації.

Завдяки MAM пацієнт та лікар можуть безпечно обмінюватися даними через Tangle, підписавшись на канал один до одного.

*Результати дослідження.* Медичні дані пацієнта страждають від фрагментації, закритих інформаційних систем та сховищ даних. А це, на жаль, створює певні труднощі, які пов'язані із доступом та обміном необхідною інформацією. Пацієнт може відвідувати багатьох лікарів, які можуть мати власні ізольовані медичні записи. Отримати доступ до цих даних неможливо. Крім того, обмін цими даними між постачальниками медичних послуг не завжди безпечний.

У статті запропоновано використання IOTA, яка дозволить здійснювати безпечний обмін медичними даними між пацієнтом та лікарем з гарантіями

їх цілісності, враховуючи величезну кількість інформації, якою обмінюються медичні організації. Використання IOTA може прискорити обмін медичними даними пацієнтів.

Завдяки застосуванню структури Tangle забезпечується висока масштабованість. До того ж, IOTA дозволяє проводити транзакції з нульовими комісіями і без фіксованого обмеження на кількість транзакцій, які можна підтвердити у секунду. Крім того, MAM дозволяє передавати потоки зашифрованих даних між користувачами, а обмежений режим дозволить пацієнту контролювати доступ до своїх медичних даних. Пацієнт може будь-коли змінити *sideKey*, що анулює доступ до даних. Запропонована система дозволить лікарям та пацієнтам обмінюватися медичною інформацією безпечним, прозорим та децентралізованим способом.

## Висновки

Таким чином, проведено огляд технології IOTA, яка завдяки своїй структурі дозволить медичним працівникам (лікарям) та пацієнтам обмінюватися медичними даними надійним і швидким способом, порівняно з існуючими методами та схемами. Протокол MAM надає додаткові функції, такі як керований контроль доступу до медичних даних пацієнта та їх шифрування, які покращують безпеку та конфіденційність.

Представлено загальну схему передачі медичних даних пацієнта до лікаря за допомогою IOTA.

Детально розглянуто процес пошуку лікаря за необхідною спеціальністю, а також описано процес створення і відправлення транзакцій у Tangle. Переваги використання Tangle проілюстровані на конкретному прикладі.

Розглянуто протокол MAM, який дозволяє пацієнту та лікарю публікувати потоки зашифрованих даних у вигляді транзакцій.

Здатність MAM забезпечувати цілісність медичних даних пацієнта та контролювати доступ до даних є ключовим фактором у використанні даного протоколу у системах охорони здоров'я громадян.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. HIMSS. Interoperability in Healthcare. Available at: <https://www.himss.org/resources/interoperability-healthcare>.
2. IBM. What is interoperability in healthcare? Available at: <https://www.ibm.com/in-en/topics/interoperability-in-healthcare>.
3. IOTA Beginners Guide. eHealth. Available at: <https://iota-beginners-guide.com/use-cases/ehealth/>.
4. Abdellatif, A. A., Samara, L., Mohamed, A., Erbad, A., Chiasserini, C. F., Guizani, M., O'Connor, M. D., Laughton, J. (2021). MEdge-chain: leveraging edge computing and blockchain for efficient medical data exchange. *IEEE Internet of Things Journal*, pp 15762-15775. doi: 10.1109/JIOT.2021.3052910.
5. Akkaoui, R., Hei, X., Cheng, W. (2020). EdgeMediChain: A Hybrid Edge Blockchain-Based Framework for Health Data Exchange. *IEEE Access*, 8, pp 113467-113486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3003575.
6. Pournaghi, S. M., Bayat, M., Farjami, Y. (2020). MedSBA: a novel and secure scheme to share medical data based on blockchain technology and attribute-based encryption. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(5). doi: 10.1007/s12652-020-01710-y.
7. Cisneros, B., Ye, J., Park, C. H., Kim, Y. (2021). CoviReader: Using IOTA and QR Code Technology to Control Epidemic Diseases across the US. 2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). doi: 10.1109/CCWC51732.2021.9376093.
8. Abdullah, S., Arshad, J., Khan, M. M., Alazab, M., Salah, K. (2022). PRISED tangle: a privacy-aware framework for smart healthcare data sharing using IOTA tangle. *Complex & Intelligent Systems*. doi: 10.1007/s40747-021-00610-8.
9. Hawig, D., Zhou, C., Fuhrhop, S., Fialho A. S., Ramachandran, N. (2019). Designing a distributed ledger technology system for interoperable and general data protection regulation-compliant health data exchange: a use case in blood glucose data. *Journal of Medical Internet Research*, 21 (6), pp. e13665. doi: 10.2196/13665.
10. Zheng, X., Sun, S., Mukkamala, R. R., Vatraru, R., Ordieres-Meré, J. (2019). Accelerating Health Data Sharing: A Solution Based on the Internet of Things and Distributed Ledger Technologies. *Journal of Medical Internet Research*, 21(6), p 13583. doi: 10.2196/13583.
11. Wang, M., Guo, Y., Zhang, C., Wang, C., Huang, H., Jia, X. (2021). MedShare: A Privacy-Preserving Medical Data Sharing System by Using Blockchain. *IEEE Transactions on Services Computing*. doi: 10.1109/TSC.2021.3114719.
12. Brogan, J., Baskaran, I., Ramachandran, N. (2018). Authenticating health activity data using distributed ledger technologies. *Comput Struct Biotechnol J.*, 16, pp 257-266. doi: 10.1016/j.csbj.2018.06.004.
13. Ключка Я. О., Шматко О. В. Порівняння технології блокчейн і спрямованого ациклічного графа при зберіганні і обробці даних в розподіленому реєстрі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2020. № 1 (3). С. 106-116. doi: 10.20998/2079-0023.2020.01.18.
14. Gangwani, P., Perez-Pons, A., Bhardwaj, T., Upadhyay, H., Joshi, S., Lagos, L. (2021). Securing Environmental IoT Data Using Masked Authentication Messaging Protocol in a DAG-Based Blockchain: IOTA Tangle, *Future Internet*, 13 (12). doi: 10.3390/fi13120312.
15. ABmushi. (2018). IOTA: MAM Eloquently Explained. Available at: <https://medium.com/coinmonks/iota-mam-eloquently-explained-d7505863b413>.
16. IOTA Foundation Blog. Introducing Masked Authenticated Messaging. Available at: <https://blog.iota.org/introducing-masked-authenticated-messaging-e55c1822d50e/>.

Received (Надійшла) 14.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

### Architecture of the system of exchange of medical data of patients with doctors on the basis of IOTA

D. Golubnychy, O. Kolomytsev, V. Tretyak, Ya. Kliuchka, A. Rybalchenko

**Abstract.** The exchange of medical information allows the electronic movement of medical data between different health information systems. Unlike traditional paper documents, electronic ones allow healthcare providers to access and share important medical information. However, existing health systems for the exchange of medical data have faced a number of issues, including confidentiality, security, and lack of patient control. Given all the above, it is proposed to use distributed registry technology, as it can dramatically change the way medical information is stored, providing secure ways to share data. The article discusses the technology of a distributed registry for the Internet of Things (IoT), called IOTA. Blockchain is already used in many healthcare systems as it addresses serious health and privacy issues. However, questions remain about the scalability and performance of the blockchain. IOTA solves these problems by using the DAG (directed acyclic graph) data structure, which allows you to add transactions in parallel. This reduces the time required to confirm transactions, and the number of transactions processed simultaneously can be unlimited. Masked Authenticated Messaging (MAM) allows you to securely transmit encrypted data streams as transactions. Therefore, the proposed system uses IOTA for the secure exchange of medical data. The process of creating and sending medical data to IOTA is illustrated by a specific example. The application of the IAM protocol on the example of transferring medical data from a patient to a doctor is considered.

**Keywords:** directed acyclic graph, medical data exchange, distributed registry technology, Masked authenticated messaging.

A. Kapiton<sup>1</sup>, R. Baranenko<sup>2</sup>, T. Franchuk<sup>3</sup>, O. Diachenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

<sup>2</sup> Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

<sup>3</sup> Kyiv National University of Trade and Economics, Kiev, Ukraine

<sup>4</sup> Mariupol State University, Mariupol, Ukraine

## INFORMATION SYSTEM OF LEGAL PROTECTION OF INTELLECTUAL PROPERTY

**Abstract.** The article analyzes the state of the problem of developing an information system of legal protection of intellectual property. Features of the concept of "intellectual property" are considered. The authors analyze the use of information and telecommunication systems in the field of legal protection of intellectual property. Possibilities of intensification of information process development in the field of intellectual property protection are shown and analyzed. A database has been developed to solve the problem of intellectual property legal protection software.

**Keywords:** information, Informatization, information systems, legal protection; intellectual property.

### Introduction

Today, modern information and communication technologies are used in the activities of almost every enterprise and organization. The modern century is characterized by intensive development and implementation in all spheres of life of the IT society. This is reflected in the intensive improvement of computer and communication technology, the emergence of new and further improvement of existing information technologies, as well as the introduction of applied information systems. Advances in computer science have played an important role in organizational management, industry, research and computer-aided design.

Informatization affected the social sphere: education, science, culture, medicine. Informatization - a set of interrelated organizational, legal, political, socio-economic, scientific and technical, production processes aimed at creating conditions to meet the information needs of citizens and society through the creation, development and use of information systems, networks, resources and information technologies. It is a process of large-scale use of IT in all spheres of socio-economic, political and cultural life of society to improve the use of information and knowledge for management, meet the information needs of citizens, organizations and the state and create conditions for the transition to information society.

### Analysis of recent research and publications.

The issue of developing an information system for the legal protection of intellectual property should be explored, starting with the analysis of the concept of "intellectual property". In particular, A. Aksyutina, O. Nestertsova-Sobakar, V. Tropin, O. Tropina believe that intellectual property is the result of intellectual, creative activity that meets the requirements of current legislation [20. p.20-23]. The following lawyers studied various aspects of this issue: Yu. Atamanova, V. Dmitryshyn, A. Abdullin, O. Kokhanovska, U. Parp N. Hrushevska considers the problem of protection of legal protection of computer programs as a product of intellectual activity, and S. Vodorezova investigates the

peculiarities of legal protection of computer program as an object of information relations [1, 6]. V. Golubev, V. Gavlovsky, V. Tsymbalyuk investigate the problem of combating crimes in the field of computer technology [3, p.19]. All opinions and results of researches of experts have allowed to draw a conclusion concerning urgency of the set task of development of information system of legal protection of intellectual property. S. Petrenko, K. Efremova and others [2- 4]. N.Hrushevska considers the problem of protection of legal protection of computer programs as a product of intellectual activity, and S. Vodorezova investigates the peculiarities of legal protection of computer program as an object of information relations [1, 6]. V. Golubev, V.Gavlovsky, V. Tsymbalyuk investigate the problem of combating crimes in the field of computer technology [3, p.19]. All opinions and results of researches of experts have allowed to draw a conclusion concerning urgency of the set task of development of information system of legal protection of intellectual property. Namely, there is a problem in studying the mechanism of using computer programs in information relations and protecting the interests of their authors.

### Main part

Communication systems and networks are one of the components of the information infrastructure, the main component for information. The development of communication determines the possibilities of implementing user access to information networks, systems and resources, obtaining a wide range of information services. The effectiveness of providing public administration bodies, economic entities of various forms of ownership, mass media and the population of the country with information and telecommunication services largely depends on the effective combination of different communication systems. The vast majority of institutions use public switched data channels. There is a well-developed network of analog transmission lines, which have now exhausted their technical capabilities. Modern communication systems based on digital information transmission methods provide better and more reliable communication [1].

Ensuring the computerization of strategic areas of statehood, security and defense means, in particular, the creation of appropriate automated, information and analytical systems and networks. The first stage of the information-analytical system of the Accounting Chamber has been introduced, which is a key element of the unified automated system of state control over the execution of the state budget. Within the information and analytical system of the Court, the second phase of the creation of a repository and communication node of e-mail for communication with public authorities and organizations is being completed [1, 2].

There are various information and telecommunication systems in the regions of Ukraine, designed to ensure the performance of administrative functions, financial and budgetary issues, taxation, science, education, health care, social protection, etc. It should be noted that in the process of creating information systems, databases and data banks, developers and users are slowly moving to modern tools such as Oracle, Informix, Sybase and more. Obsolete tools such as Clipper, FoxPro, etc. are commonly used. At a low level, developers are "armed" with the necessary tools and technologies to support engineering, creating computer systems with complex distributed applications.

Unfortunately, the activities of state bodies and organizations in the design and use of information resources are inconsistent, which leads to some difficulties in creating a single information environment and, as a consequence, a low level of information and analytical support of state bodies. Today, electronic information resources of interest to the executive and the legislature already exist or are being created. Uncertainty about the legal and financial base of various entities working in the field of computerization leads to a monopoly on the information of management and business structures on open public information resources, depreciation of the cost of public information resources and restrictions on the right to use.





A common feature of sectoral programs is the improvement of public administration by computerizing the activities of relevant executive bodies and their features are manifested in the forms of information support of industry and ways to provide information

resources to third-party users. The issue of attracting foreign and domestic investment in computerization projects remains relevant. Despite some changes in this direction (for example, a computer information network of education, science and culture has been created at the expense of foreign sponsorship resources), the possibilities of intensifying this process remain unrealized.

To implement the database, the software environment was chosen - dbForge Studio for SQL Server. dbForge Studio for SQL Server is an environment for developing SQL Server databases, generating data reports, analyzing them, and performing basic administration tasks. dbForge Studio speeds up everyday tasks and allows you to make comprehensive changes to the database. Features of dbForge Studio for SQL Server: accelerate SQL code writing in a user-friendly scripting environment; generate and re-create tables without data loss; comparison of databases, synchronization of schemes and data; analysis of the interdependence of objects when changing databases with a complex structure; automatic deployment of databases on the work server; preparation of reports and automation of their distribution; fast and efficient security management in databases [3-5].

The designed and developed database will contain tables that correspond to the entities inherent in the field of legal protection of intellectual property: «CopyrightHolder» - the owner of copyright; «Work» - work that is the subject of intellectual property; «License» - work license; «InfringementAct» is an act of infringement; «InfringingWork» is work that infringes intellectual property rights; «Infringer» is an infringer; «CourtVerdict» is a court decision; «Liability» is a liability; «HolderWork» is an auxiliary spreadsheet. language such as "many to many".

After directly creating each of the tables, set the required data types for the columns, indexes, and constraints where necessary. The operation of the search queries was checked by selecting the "Execute" context menu item in text mode, which led to the output of the data selected by the query. The figure below shows that the query extracts basic information from the database and provides it in a convenient way (Fig.1).

CopyrightHolderName varchar(35)	WorkTitle varchar(100)	WorkImage image	InfringerName varchar(35)
→ Apple Inc.	Magic Keyboard		Pro Electronics Corp
Microsoft	Windows		Free OS Group
Adidas	Adidas		Huaneng Boots International, Inc.
Billie Eilish	No time to die		Peter Parker




InfringingWorkTitle varchar(50)	InfringingWorkImage image	ActDate date	CourtDate datetime	Verdict varchar(50)
Pro Keyboard		07.10.2021	26.11.2021 20:58:47.797	(null)
Windows Repack		15.10.2021	22.10.2021 20:59:59.490	Guilty
Abibas Boots		15.09.2021	22.10.2021 21:00:56.890	Guilty
14th Game	(null)	29.09.2021	05.10.2021 21:01:53.103	Justified

Fig. 1. The results of the query

For each database that is implemented, you need to perform a series of tests to minimize future usage problems. In software products, data is transferred from the user to the internal database and vice versa. Database testing is the verification of various aspects related to the database, including the reliability and integrity of the data. The basic testing of the created database was carried out, namely the structure check: CRUD-testing (C (Create) - check the storage of any new transaction (operation "insert"); R (Read) - check the viewing or search of any saved transaction (operation "select"); U (Update) - update an existing record ("update" operation); D (Delete) - check the deletion of any record ("delete" operation); ACID testing (A (Atomicity) - transactions can be described by the phrase "all or nothing"; C (Consistency, consistency) - only real data is stored; I (Isolation, isolation) - transactions do not affect each other; D (Durability, durability) - recorded data will not be lost.

### Conclusions

The rapid development of digital technologies is changing the reality and the manufacturing sector around the world - modern companies have access to more data than ever before. Progressive organizations can now use databases and informatization mechanisms in general to move from simple data storage and basic transactions to analyzing large amounts of data from multiple systems and optimizing many processes. With databases and other computing tools and business analysis, today's organizations can use the data collected to work more efficiently, make decisions more efficiently, and be more flexible and scalable. The ability to create and use databases gives users control and autonomy while maintaining important security standards.

The creation of an information base of intellectual property rights is due to the existence of certain objective grounds and reasons.

First, the need for legislation and consolidation of non-property and property rights of creators (authors) to their works, as well as the rights of society to access these works. Secondly, the need for the state, represented by its government and authorized bodies, to ensure the sustainable development of the country's economy using the latest technologies, by encouraging initiative and creativity, dissemination and application of creative work, and promoting free trade for economic and economic interests. social development of society. Third, to integrate into the world community, through the design, development and implementation of modern software in the legal field.

During the study, a database for the legal protection of intellectual property was developed, which allows you to conveniently store data on a wide range of aspects of this area. The following actions were performed when solving the task: created database structures (initial formation), indexes and index expressions for tables (to further establish relationships between tables); the tables were filled with information; tables are linked by foreign keys (one to one, one to many and many to many); developed the necessary queries to solve the problems that were set in the condition. The customer base was compiled, scheduled meetings and tasks were specified, and notifications were set for them.

Thus, the goal of developing an information system of intellectual property rights is to protect the interests of authors and other creators of intellectual property, by giving them certain defined, limited time rights that allow them to dispose of these results, control their use by third parties, to obtain a certain economic effect from such use. In the process of designing the information system, it was taken into account that these rights apply not only to the material object in which the result of creative work is embodied or may be embodied, but to the product of the human mind as such.

### REFERENCES

1. Информатизация экономики URL: [http://megalib.com.ua/content/1965\\_710\\_Informatizaciya\\_ekonomiki.html](http://megalib.com.ua/content/1965_710_Informatizaciya_ekonomiki.html)
2. Аксютіна, А., Несерцова-Собакар, О., Тропін, В. Інтелектуальна власність: навч. посібник Дніпро, Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ, 2017. 140 с.
3. Голубев, В., Гавловський, В., Цимбалюк, В. Інформаційна безпека: проблеми боротьби зі злочинами у сфері використання комп'ютерних технологій. Запоріжжя: Просвіта, 2021. 252с.
4. Парпан, У. Інформатизація – сучасна тенденція розвитку освіти URL: <http://aphd.ua/publication-381/>
5. CRM – забота о потребителе URL: <http://allrefs.net/c21/4bgsb/p74/>
6. Карітон, А. Modern problems of information security. Причорноморські публічно-правові читання: Матеріали міжнародної наукової конференції. Гельветика. 2021. Ч. 1. С.99-101.
7. Опис продукту dbForge Studio URL: <https://itpro.ua/product/dbforge/?tab=description>

Received (Надійшла) 30.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.01.2022

### Інформаційна система правового захисту інтелектуальної власності

А. Капітон, Р. Бараненко, Т. Франчук, О. Дяченко

**Анотація.** Стаття аналізує стан проблеми розробки інформаційної системи правової охорони інтелектуальної власності. Розглянуто особливості поняття «інтелектуальна власність». Авторами виконано аналіз використання інформаційно-телекомунікаційних систем в сфері правової охорони інтелектуальної власності. Показані та проаналізовані можливості інтенсифікації розвитку інформаційного процесу в сфері охорони інтелектуальної власності. Розроблено базу даних для вирішення проблеми програмного забезпечення правової охорони інтелектуальної власності.

**Ключові слова:** інформація, інформатизація, інформаційні системи, правова охорона, інтелектуальна власність.



Victor Krasnobayev, Sergey Koshman, Dmytro Kovalchuk

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

## THE CONCEPT OF USING THE NUMBER SYSTEM IN THE RESIDUAL CLASSES FOR BUILDING ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM

**Abstract.** The **subject** of the article is the consideration of the concept of constructing an artificial intelligence (AI) system based on the use of a non-positional system of residual classes (RNS). This concept is based on the hypothesis of the holographic principle of building the memory of biological systems. The **purpose** of the article is to consider a method for constructing an information model of the process of information processing by the human brain, based on the assumption that the storage and processing of information is carried out in the RNS. **Tasks:** to consider a model of the process of information processing by the human brain; consider the proposed model of information processing by the human brain in the RNS; to study the influence of RNS properties in the creation of intelligent computing systems. **Research methods:** methods of analysis and synthesis of computer systems, data analysis, number theory, coding theory in RNS. The following **results** are obtained. The article considers a model of the process of information processing by the human brain, based on the assumption that the storage and processing of information is carried out in the RNS. When accepting the hypothesis of the holographic principle of information processing by the human brain, the expediency and efficiency of building AI systems based on the information processing model in RNS is obvious. This is due to the fact that the principles and methods of information processing in the RNS are in good agreement with modern ideas about the process of information processing by the human brain. The accuracy of the description (representation) of the information object G depends on the number and value of RNS bases. So, the greater the number of RNS bases and the greater their value, the more accurately the information object G is described using frames. This fact confirms the feasibility of using RNS. **Conclusions.** The main idea of the study is to consider the hypothesis of the holographic principle of building the memory of biological systems. In this case, the failure of one or more memory cells does not affect the normal functioning of the biological model of the brain, i.e. each unit of initial information is distributed over the entire surface of the hologram. In the article, AI is presented as a model of computational processes operating in RNS. Thus, the expediency and efficiency of building AI systems based on the information processing model functioning in the RNS is assessed as obvious.

**Keywords:** artificial intelligence, number system in residual classes, information processing by the human brain, non-positional number system.

### Introduction

The term artificial intelligence (AI) was first introduced in 1956 at a summer conference at the University of Dortmund [1]. Currently, the theory of creating AI is developing simultaneously in various directions: neural networks [2], evolutionary computing [3], fuzzy logic [4], intelligent applications [5], distributed computing [6], etc. Despite the fact that prominent scientists from many fields of science argue about the capabilities of artificial intelligence systems and their applications, no one doubts the importance and necessity of research on this problem.

At the present stage of development of cybernetic systems in the process of research, the main goal of creating AI has been determined - imitation of human mental activity [7], i.e. transfer to the computer system (CS) of "unintelligent" tasks for unloading a person from mechanical work [8]. Despite the urgency of the problem of creating AI systems, the transition from studying the process of information processing in human brain systems to the direct application of research results in technical systems encounters a serious obstacle - the lack of a satisfactory information model of AI that corresponds to modern ideas about the information activity of the brain [9].

The nature of thinking, the work of the human brain is largely unknown, and AI systems are not at all obliged to copy the work of the brain. When creating AI systems, three approaches to their synthesis are possible: based on

the cognized (or assumed) methods of processing information by the human brain; on other (yet unknown) principles than in living nature; based on combined (symbiosis) methods (technical and wildlife) of information processing. The article proposes to consider a method for constructing an information model of the process of information processing by the human brain, based on the assumption that information storage and processing is carried out in a non-positional number system in residual classes (RNS) [10].

### Human brain information processing and ai problems

The most important factor in the reliability of the brain is the multifunctionality of many structural formations or, more precisely, of their neural (primary neural structures - PNS) populations [11].

Let's note the main specific informational features of the human brain. Large information capacity.

At the same time, there is informational, structural and functional redundancy, which leads to high reliability and vitality of the brain.

The ability to restore lost information through the use of intact parts of the brain, which corresponds to functional redundancy and ensures high reliability and accuracy of information processing.

A large amount of simultaneously processed information. High speed of information processing.

The problem of studying the capabilities of the human brain (in particular, informational and constructive

reliability, performance, memory capacity, etc.) is one of the cardinal tasks of cybernetics for reproducing certain aspects of its functioning in technical systems for various purposes [12].

AI can be synthesized only after the creation of a "conceptual bridge", which makes it possible to make the most of knowledge from various fields of science about the principles of the human brain. Although the structure of the human brain and peripheral nervous system differs significantly from the structure of modern computer systems and the organization of its work in general, some aspects of their work can be investigated according to the "black box" principle.

To synthesize technical systems that perform AI tasks, it is necessary to highlight the main features of AI systems:

- the presence in them of their own internal model of the external world;
- the ability to fill with existing knowledge (the ability to self-study);
- the ability to deductive conclusion;
- understanding of natural language;
- the ability to interact with a person in a dialogue;
- the ability to adapt to situations;
- high reliability, fail-safe and survivability.

The tasks of AI systems at each stage of the development of society are different, i.e. the requirements imposed by humans on AI systems are also different.

The main tasks of AI systems at this stage of development of technical information processing systems are as follows:

- proof of mathematical theorems;
- development of game models (chess, checkers, etc.);
- pattern recognition;
- robotics;
- translations from one language to another;
- expert systems, etc.

Note that almost all of these tasks can be used (and are already being used) in military affairs. In this aspect, the creation of AI systems and their use in automated military control systems can significantly increase the combat effectiveness of the weapons used.

The game models developed by the AI system can be used in planning and conducting military operations on a global scale, which may be beyond the power of a military headquarters of any rank.

Pattern recognition techniques can be used in night vision devices, in homing unmanned aircraft and missiles, as well as in the development of a cruise missile guidance system.

Achievements of robotics based on the application of modern concepts and ideas for building AI systems, can be used to create unmanned means of destroying enemy manpower and equipment and, finally, in expert systems.

These systems are information objects that perform the functions of storing, replenishing and issuing information certificates to the consumer.

Expert systems can be widely used in military ICS as an "advisor" to the operator in typical (or even dead-end!) situations.

### **The proposed model of information processing by the human brain in the system of residual classes**

The problem of creating AI systems contains many issues of both social, philosophical nature, and technical ones. However, in one work it is impossible to highlight all aspects of AI cognition, in this regard, as mentioned above, we will restrict ourselves to considering the assumptions about the possible version of information processing by the human brain.

In terms of information, the human brain is a system for receiving, issuing and processing information. This system is characterized by a variety of parameters and, first of all, by the amount of stored information, the speed and reliability of its processing. In our case, we will try to explain the possibility of simultaneous storage in the human brain of a large amount of information, its high processing speed and ultra-high reliability of memory from the point of view of the information processing principles in RNS.

The brain is characterized by a large amount of simultaneously stored information. The constructive organization of such a volume of memory in existing CS at the present stage of development of the element base is a very complex process. In this regard, one of the promising directions is the method of layer-by-layer growth of three-dimensional structures. Scientists' calculations show that a memory cube with a volume of  $10^{10}$  bits of information built in this way will have an acceptable mass and dimensions. However, there are still many unsolved problems here, one of which is the low reliability of the functioning of such a memory cube.

To increase the reliability of artificial memory, you can record this volume  $G$  information in parallel in several memory cells, distributing it according to the holographic principle. With such an organization of memory, the failure of one or part of the memory cells will hardly affect the normal functioning of the human brain model, since each unit of initial information will be distributed over the entire surface of the hologram. In other words the memory is distributed, i.e. there is a spatial overlay of images in a person's memory. In this aspect, there is an analogy between biological and holographic memory.

It is known that the human brain processes huge amounts of information in short periods of time. However, it cannot be argued that the human brain functions at a high speed. Most likely, the high efficiency of brain activity is achieved due to the simultaneous parallel processing of a large amount of information, which is inherent in the human brain. Such a high speed of information processing is hardly achievable in modern CS operating in positional number systems (PNS), which process information sequentially, stage by stage. The existing methods of increasing the productivity of the CS in the PNS do not fundamentally solve the problem of organizing highly parallel information processing. According to modern concepts, information in the human brain is perceived and processed according to the holographic principle by means of frames. By frames we mean the minimum indivisible amount of information

presented in various forms (visual, semantic, etc.), which uniquely defines a given class of objects. Frames play the role of optimal, standard programs with the help of which computational algorithms are implemented, which reduces the number of auxiliary computations. This circumstance makes it possible to reduce the non-productive costs for the speed of the compressor station. Apparently, each person has his own individual set of frames in the brain, while it is possible that over time, the structure of the frames, in the informational plane, can change. Frames play the role of optimal, standard programs with the help of which computational algorithms are implemented, which reduces the number of auxiliary computations. This circumstance makes it possible to reduce non-productive costs for the speed of the CS. To all appearances, each person's brain has its own individual set of frames, and it is possible that the structure of frames may change over time, in the informational sense.

A distinctive feature of holographic memory devices is their large capacity and ultra-high reliability. This shows that when imitating the activity of the human brain, the closest of the known technical principles of information processing is the principle of holographic storage of information, which probably makes further research in this direction promising.

One of the main tasks that arises when modeling AI systems is to ensure their high reliability, i.e. the ability of systems to keep in time within the established limits the value of all parameters characterizing the ability to perform the required functions in the specified modes and conditions of use. The research on the nature of the ultra-reliable functioning of the human brain is one of the main tasks of cybernetics at the present time. The human brain, which has evolved over thousands of years, has achieved a high degree of perfection as a super-efficient information-management system with high reliability, fault tolerance and survivability. This is manifested in the ability of the brain to function in parallel even with the failure of millions of PNS, which are elements of information processing in the human brain. Note that that the term "reliability" defined for technical systems is not always applicable to living organisms. Indeed, such properties of reliability as durability, maintainability and preservation can hardly be used in the characterization of the brain. This suggests that the reliability of the brain may have a completely different nature, which differs from the means of ensuring the reliability, survivability and fault tolerance of technical means of information processing, in particular, modern positional CS.

The need to explain individual properties of living organisms for their use in the developed technical systems makes it necessary to at least roughly determine, using well-known concepts and definitions, the methods of increasing reliability used in the human brain. One of such methods, perhaps, is the simultaneous use of various types of redundancy (structural, informational, functional, etc.) both at the level of PNS and at the level of individual groups of PNS.

This method is widely used in information processing systems to improve the reliability of its processing [13]. This method is most effective in case of

constant item-by-item reservation of PNS and with dynamic reservation of individual groups of PNS [14]. Most likely, all types and varieties of redundancy are simultaneously present in the human brain. In a CS, it is not always possible to simultaneously implement all types of redundancy at all levels. This is due to the difficulty of physical implementation of such redundant systems, in particular, the high technical costs of this implementation. The second thing that can explain the high degree of brain reliability is the holographic principles of information processing. The process of obtaining a hologram by mathematical methods is represented as a direct Fourier transform, and the process of image reconstruction on this hologram is represented as a corresponding inverse transform.

Let the function  $f(t)$ , and the loss of information at any small-time interval is unacceptable  $\Delta t$ .

From the point of view of ensuring high reliability of processing the function  $f(t)$ , it is more expedient to deal not with the function  $f(t)$  itself, but with its spectrum, since each line of this spectrum carries information about the entire function  $f(t)$  (like a fragment of a plate holograms) on the period of its change  $T$ . If for some reason the spectrum of the function  $f(t)$  is distorted, then during its restoration there is no loss of information completely, but simply information about the object (object, phenomenon) is received less accurately. This fully applies to frames as well. Indeed, the clarity of the display of an information object in a person's memory depends on the number of features that describe this object.

The above reasoning shows that outwardly, the process of functioning of the human brain is in good agreement with the holographic principles of information processing. Thus, when building information systems for information processing, it is necessary to introduce holographic signs in the CS number system itself, which facilitate the organization of parallel information processing [15].

The representation of a number in the residual class system is based on the concept of a residue and the Chinese remainder theorem.

The RNS is defined by a set of pairwise coprime modules  $(m_1, m_2, \dots, m_n)$ , that is, such that

$$GCD(m_i, m_j) = 1, (i, j = 0, 1, \dots, n; i \neq j)$$

called a basis, and the product

$$M = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_n,$$

so that each integer  $x$  from the segment  $[0, M - 1]$  is set matching the set of residues  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , where

$$x_1 \equiv x \pmod{m_1};$$

$$x_2 \equiv x \pmod{m_2};$$

...

$$x_n \equiv x \pmod{m_n}.$$

Moreover, the Chinese remainder theorem guarantees the uniqueness (uniqueness) of the representation of non-negative integers from the segment  $[0, M - 1]$ .

RNS have applications in the field of digital computer arithmetic. By decomposing in this a large integer into a set of smaller integers, a large calculation can be performed as a series of smaller calculations that can be performed independently and in parallel.

Multi-modular arithmetic is widely used for computation with large integers, typically in linear algebra, because it provides faster computation than with the usual numeral systems, even when the time for converting between numeral systems is taken into account. Other applications of multi-modular arithmetic include polynomial greatest common divisor, Gröbner basis computation and cryptography.

Thus, RNS is widely used today in various fields. For example, in microelectronics, in specialized digital signal processing devices, where it is required:

- error control by introducing additional redundant modules;
- high speed of work, which is provided by the parallel implementation of basic arithmetic operations;
- Information Security.

The basis for the creation of calculators operating in the RNS is the ability to simultaneously use all the number-theoretic properties of the RNS.

Let's highlight three main properties of RNS.

- Independence of the remnants. Taking this property into account makes it possible to construct a special processor in the form of a set of  $n$  independent computational paths operating in parallel in time. This circumstance makes it possible to parallelize the computed algorithm at the level of microoperations, which is fundamentally impossible for any of the existing positional number systems. This makes it possible to implement most of the arithmetic operations in one cycle of the calculator operation.

- Equality of residues. Any remainder of the number presented in the RNS carries information about its quantitative value. This makes it possible by software methods to replace the failed computational path modulo  $m_i$  with an operable path modulo  $m_j$  ( $m_i < m_j$ ) without interrupting the solution of the problem. In addition, the special processor in the RNS maintains its operability in the event of failures of several computational paths simultaneously and is capable of executing the program with a slight decrease in the computational accuracy. That is, such a special processor has the property of functional survivability. In this aspect, the special processor in the RNS can be classified as a natural fault-tolerant computing structure.

- Low-bitness of residues. Tabular algorithms for the implementation of arithmetic operations in the RNS can significantly improve performance. This is achieved due to the possibility of parallelizing algorithms at the level of micro-operations of a special processor.

It is known that the numbers  $A_k$  in the RNS are represented by a set of residuals

$$a_i = A_k - [A_k / m_i] m_i \quad (i = \overline{1, n})$$

from dividing them by the chosen base system  $\{m_i\}$  [16-18].

The most frequent consideration is the RNS, for which the base  $m_i$  is chosen by integers and positive numbers, and the system of bases is chosen so that they are mutually simple in pairs, i.e.

$$\text{GCD}(m_i, m_j) = 1, \text{ for } i \neq j.$$

As from the principle of constructing the RNS, each residue  $a_i$  carries information about the entire original object  $G$  described by the information code  $A_k$ , and the range of code words (the range of numbers containing, the totality of all possible values of  $A_k$ ) is represented as

$$\left[ 0, \prod_{i=1}^n m_i - 1 \right).$$

For this range there is a one-to-one correspondence between the numbers in the RNS in the PNS. The greater the number of RNS bases  $n$  and the larger they are in size, the more accurately the information object  $G$  is described. This is similar to the fact that the image of the object  $G$  on a fragment of a holographic plate is less clear than on the plate itself. If we take a part of a hologram (a part of  $n$  RNS bases) and attach several similar parts to it (add several RNS bases), then the image of object  $G$  will become clearer (object  $G$  is displayed more fully and more informative). Obviously, there is an analogy between the methods of information processing in RNS and the principles of constructing holograms [19].

Note that when processing information in the RNS, there is a possibility of exchange operations between the accuracy of computing the algorithm, reliability and speed in the dynamics of the computational process. Let an object  $G$  be described by a set of bases  $\{m_i\}$  RNS ( $i = \overline{1, n+k}$ ). The execution time of arithmetic operations and the accuracy of the solution depends on the number of information bases  $n$ , and the reliability (validity) of calculations depends on the number of check bases  $k$ . Suppose that in the course of calculations it became necessary to improve the reliability of calculations.

In this case, there is a redistribution of the RNS bases  $i = \overline{1, n'+k'}$ , while

$$n' < n \text{ and } k' > k \text{ and } n+k = n'+k' = \text{const}.$$

In this case, the accuracy of calculations decreases and the performance of data processing increases, which are determined by the number of bases  $n'$ .

If it becomes necessary to increase the accuracy of the solution in a separate section of the computed program, then the program is redistributed as follows:

$$i = \overline{1, n''+k''} \quad (n+k = n'+k' = \text{const}).$$

With an increase in the accuracy of calculations ( $n'' > n'$ ) decreases their reliability and performance ( $k'' > k'$ ).

Note that the possibility of organizing exchange operations in the PNS (for example, variable scaling, etc.) does not have the same flexibility and versatility as the methods that provide exchange operations in the RNS.

This makes it possible to more flexibly approach the solution of various types of problems, which is inherent in the human brain. In addition, during the construction and study of the reliability models of the CS in the RNS, it was found that when codes are used in the RNS, various types of redundancy are simultaneously manifested (present): structural, informational and functional [20].

Indeed, structural redundancy is manifested when constructing a computing system based on a set of independent and parallel in time computing paths according to the appropriate bases  $m_i$ .

In this case, these computational paths ( $i = \overline{1, n}$ ) play the role of the main elements of the reserve, and the paths on the bases  $m_j = (\overline{j = n+1, n+k})$  - the role of backup elements.

In addition, in the ordered ( $m_i < m_i + 1$ ) RNS of the base  $m_j (\overline{j = n+1, k})$  play the role of control paths, the information of which makes it possible to organize the process of detecting and correcting errors. Informational redundancy is also manifested in this aspect.

In addition, it was shown that the role of functional redundancy, i.e. the ability of one control path to take over the functions of up to  $r$  failed information computing paths, is manifested when the condition

$$m_j \geq \prod_{i=1}^r m_{k_i}$$

is observed.

Obviously, construction of systems on principles of information processing in RNS the high reliability and survivability is reached, approaching in this plan to activity of a human brain.

The model of the information object in the RNS is in good agreement with the modern concept of a frame. Let the frame describing the information object  $G$  be numerically represented in the RNS. In this case, the accuracy of the description (representation) of the object  $G$  depends on the number and values of the RNS bases. So, the larger the number of bases and the larger they are

in terms of  $m_i$ , the more accurately the information object  $G$  is described by means of frames. This fact once again confirms the expediency of using the RNS.

## Conclusions

Artificial intelligence is traditionally understood as the property of intelligent systems to perform creative functions. Historically, creative activity was considered the prerogative of a person. However, modern technologies for creating intelligent machines, especially intelligent computer programs, make it possible to explore new possibilities in solving creative problems [15, 19]. And our article is one example in the search for ways to create AI.

AI is concerned with solving the problems of using computers to understand human intelligence. That being said, AI techniques are not necessarily limited to biologically plausible methods. Intelligent systems existing today have rather narrow areas of application. And in our article we also consider one of the possible directions in the construction of AI based on the RNS.

We consider the hypothesis about the holographic principle of constructing the memory of biological systems. In this case, the failure of one or several memory cells does not affect the normal functioning of the biological brain model, i.e. each unit of initial information is distributed over the entire surface of the hologram. This is the main idea of our research. We represent AI as a model of computational processes operating in a residual class system. The redundancy capabilities in the RNS allow you to improve reliability and fault tolerance. This is very similar to the functioning of biological processes in the human brain. Thus, when accepting the hypothesis about the holographic principle of information processing by the human brain, the expediency and effectiveness of building AI systems based on the information processing model of the CS, functioning in a non-positional number system in the residual classes, is obvious. This is due to the fact that the principles and methods of information processing in the RNS are in good agreement with modern concepts and ideas about the process of information processing by the human brain.

## REFERENCES

1. A. Kaplan and M. Haenlein, "Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence," *Business Horizons*, vol. 62, no. 1, pp. 15–25, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.bushor.2018.08.004.
2. S. E. Dreyfus, "Artificial neural networks, back propagation, and the Kelley-Bryson gradient procedure," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 13, no. 5, pp. 926–928, Sep. 1990, doi: 10.2514/3.25422.
3. J. Schmidhuber, "Deep learning in neural networks: An overview," *Neural Networks*, vol. 61, pp. 85–117, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
4. P. A. Vikhar, "Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects," in *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, Dec. 2016, pp. 261–265. doi: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955308.
5. L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
6. F. J. Pelletier, "Petr Hájek. Metamathematics of fuzzy logic. Trends in logic, vol. 4. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, and London, 1998, viii + 297 pp.," *Bulletin of Symbolic Logic*, vol. 6, no. 3, pp. 342–346, Sep. 2000, doi: 10.2307/421060.
7. V.M. Amerbaev, R.A. Solovyev, A.L. Stempkovskiy, D.V. Telpukhov, "Efficient calculation of cyclic convolution by means of fast Fourier transform in a finite field", in: *Proceedings of IEEE East-West Design Test Symposium (EWDTS 2014)*, 2014: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2014.7027043>.

8. "White Paper on Artificial Intelligence: a European approach to excellence and trust," *European Commission - European Commission*. [https://ec.europa.eu/info/publications/white-paper-artificial-intelligence-european-approach-excellence-and-trust\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/white-paper-artificial-intelligence-european-approach-excellence-and-trust_en) (accessed Apr. 23, 2021).
9. A. S. Tanenbaum and M. V. Steen, *Distributed Systems: Principles and Paradigms*, US Ed edition. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2002.
10. A. Lieto, C. Lebiere, and A. Oltramari, "The knowledge level in cognitive architectures: Current limitations and possible developments," *Cognitive Systems Research*, vol. 48, pp. 39–55, May 2018, doi: 10.1016/j.cogsys.2017.05.001.
11. J. O. Tuazon, "Residue number system in computer arithmetic," Doctor of Philosophy, Iowa State University, *Digital Repository, Ames*, 1969. doi: 10.31274/rtd-180816-2270.
12. J. L. P. velazquez and R. Wennberg, Eds., Coordinated Activity in the Brain, *Measurements and Relevance to Brain Function and Behavior*. New York: Springer-Verlag, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-93797-7.
13. O. Goloubeva, M. Rebaudengo, M. S. Reorda, and M. Violante, Eds., "Achieving Fault Tolerance," in *Software-Implemented Hardware Fault Tolerance*, Boston, MA: Springer US, 2006, pp. 117–151. doi: 10.1007/0-387-32937-4\_4.
14. V. Krasnobayev, A. Kuznetsov, A. Yanko, and T. Kuznetsova, "The analysis of the methods of data diagnostic in a residue number system," in *Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Zaporizhzhia, Ukraine, April 27-May 1, 2020*, 2020, vol. 2608, pp. 594–609. Accessed: Jul. 02, 2020. [Online]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper46.pdf>
15. Y. Zhang, "An FPGA implementation of redundant residue number system for low-cost fast speed fault-tolerant computations," *Thesis*, 2018. doi: 10.32657/10220/47113.
16. V. Krasnobayev, A. Kuznetsov, A. Yanko, and K. Kuznetsova, "The data errors control in the modular number system based on the nullification procedure," in *Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Zaporizhzhia, Ukraine, April 27-May 1, 2020*, 2020, vol. 2608, pp. 580–593. Accessed: Jul. 02, 2020. [Online]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper45.pdf>
17. D.I. Popov, A.V. Gapochkin, "Development of Algorithm for Control and Correction of Errors of Digital Signals, Represented in System of Residual Classes", in: *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2018: pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501826>.
18. P.V. Ananda Mohan, "Specialized Residue Number Systems", in: P.V.A. Mohan (Ed.), *Residue Number Systems: Theory and Applications*, Springer International Publishing, Cham, 2016: pp. 177–193. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41385-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41385-3_8).
19. D. I. Popov and A. V. Gapochkin, "Development of Algorithm for Control and Correction of Errors of Digital Signals, Represented in System of Residual Classes," in *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sep. 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501826.
20. T.-C. Huang, "Self-Checking Residue Number System for Low-Power Reliable Neural Network," in *2019 IEEE 28th Asian Test Symposium (ATS)*, Dec. 2019, pp. 37–375. doi: 10.1109/ATS47505.2019.000-3.

Received (Надійшла) 28.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.03.2022

### Концепція застосування системи числення у залишкових класах для побудови системи штучного інтелекту

В. А. Краснобасв, С. О. Кошман, Д. М. Ковальчук

**Анотація.** Предметом статті є розгляд концепції побудови системи штучного інтелекту (ШІ) з урахуванням застосування непозиційної системи залишкових класів (СЗК). Ця концепція полягає в гіпотезі про голографічний принцип побудови пам'яті біологічних систем. Метою статті є розгляд методу побудови інформаційної моделі процесу обробки інформації мозком людини, виходячи з припущення, що зберігання та обробка інформації здійснюється у СЗК. **Задачі:** розглянути модель процесу обробки інформації мозком людини; розглянути припущену модель обробки інформації мозком людини у СЗК; дослідити вплив властивостей СЗК при створенні інтелектуальних обчислювальних систем. **Методи дослідження:** методи аналізу та синтезу комп'ютерних систем, аналізу даних, теорія чисел, теорія кодування у СЗК. Отримано такі **результати.** У статті розглядається модель процесу обробки інформації мозком людини, яка заснована на припущенні, що зберігання та обробка інформації здійснюється у СЗК. При прийнятті гіпотези про голографічний принцип обробки інформації людським мозком очевидна доцільність та ефективність побудови систем ШІ на основі моделі обробки інформації у СЗК. Це пов'язано з тим, що принципи та методи обробки інформації в СЗК добре узгоджуються з сучасними уявленнями про процес обробки інформації мозком людини. Точність опису (подання) інформаційного об'єкта  $G$  залежить від кількості та значення базисів СЗК. Так, чим більше кількість основ СЗК, і чим вони більше за значенням, то точніше інформаційний об'єкт  $G$  описується з допомогою фреймів. Цей факт підтверджує доцільність використання СЗК. **Висновки.** Основною ідеєю дослідження є розгляд гіпотези про голографічний принцип побудови пам'яті біологічних систем. При цьому вихід із ладу однієї чи кількох копій пам'яті не впливає нормальне функціонування біологічної моделі мозку, тобто кожна одиниця вихідної інформації розподіляється по всій поверхні голограми. У статті ШІ представляється як модель обчислювальних процесів, що працюють у СЗК. Таким чином, доцільність та ефективність побудови систем ШІ на основі моделі обробки інформації, що функціонує у СЗК, оцінюється як очевидна.

**Ключові слова:** штучний інтелект, система числення в залишкових класах, обробка інформації людським мозком, непозиційна система числення.

Е. Е. Малохвій, Г. І. Молчанов, Ю. В. Паржин

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТОКОЛІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В УМОВАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

**Анотація.** Предметом дослідження в статті є протоколи передачі даних в умовах Інтернет речей. Мета роботи – порівняння протоколів Інтернет речей на базі демонстраційного стенда. У якості апаратної платформи розглядається модуль WeMos D1, який використовує технологію передачі даних Wi-Fi, що є найбільш поширеною на сьогоднішній день для пристроїв Інтернет речей. В ході експерименту визначаються затримки, втрати пакетів в залежності від їх розміру, відношення службової інформації до корисної за одну транзакцію при передачі даних з використанням протоколів: MQTT, CoAP, HTTP/2; з метою визначення, в яких пристроях наведені протоколи найбільш ефективні.

**Ключові слова:** Інтернет речей, протокол, MQTT, CoAP, HTTP/1.1, HTTP/2

### Вступ

Багато технологій кардинально змінили стиль життя протягом ХХІ ст.: радіозв'язок, телебачення, комп'ютери, мобільні телефони та Інтернет є незамінними в сучасному світі. Особливого поширення набула технологія Інтернет речей, основною концепцією якої є можливість підключати усілякі об'єкти «речей» до мережі, обробляти інформацію, що надходить з навколишнього середовища, обмінюватися нею і виконувати різні дії залежно від отриманої інформації. Інтернет речей вважають наступним етапом технічної революції [1]. Важливими функціями цієї концепції є полегшення повсякденного життя, підвищення ефективності та якості роботи, енергозаощадження тощо.

В даний час Інтернетом речей охоплюється величезний спектр галузей, починаючи від промисловості і закінчуючи продуктами харчування [2]. Прикладом впровадження Інтернет речей є система «розумний будинок». Однією із функцій «розумного будинку» є контроль параметрів навколишнього середовища, залежно від чого здійснюється регулювання життєво важливих показників, таких як температура та вологість, в приміщенні. У зимовий період нагріваючі прилади залежно від температури повітря ззовні, вітру, часу доби без втручання людини регулюють інтенсивність опалення, що дає змогу значно зменшити споживання енергоносіїв. А це дозволяє створити максимально комфортні умови проживання людей при максимально економному споживанні ресурсів.

Дедалі частіше дані від «речей» передаються в мережу зв'язку загального користування на хмарні сервіси. Для передачі даних використовуються протоколи, яких зараз налічується близько двадцяти п'яти [3]. Серед існуючих протоколів Інтернету речей найбільшого поширення набули протоколи: MQTT, CoAP, HTTP/2, які використовуються для збору та передачі даних між пристроями та іншими учасниками інфраструктури Інтернет речей [4]. Однак у кожного протоколу є свої особливості функціонування, які проявляються при стресових режимах експлуатації мережі. З цієї причини, вибір і використання будь-якого протоколу стали нагальною проблемою, оскільки завантаження мережі з кожним

роком все зростає. У статті розглянуто і проаналізовано особливості функціонування протоколів: MQTT, CoAP, HTTP/2 на базі власного демонстраційного стенду. В результаті аналізу запропоновані рекомендації по використанню конкретних протоколів для різних типів пристроїв.

### Виклад основного матеріалу

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) — простий протокол обміну повідомленнями, який реалізує модель «публікація / підписка» (*publish / subscribe*). Протокол створювався для забезпечення відкритості, простоти, мінімальних вимог к ресурсам та зручності впровадження [5].

Протокол створювався, щоб забезпечити відкритість, простоту, мінімальні вимоги до ресурсів та зручність. MQTT базується поверх TCP/IP та працює з моделлю «клієнт / сервер», де кожен датчик є клієнтом та підключений до серверу, який виступає у ролі брокера. Протокол MQTT потребує обов'язкової наявності брокера, який керує розподілом даних підписникам. Усі пристрої та актуатори надсилають дані тільки брокеру та отримують дані лише від нього. У мережі на базі протоколу MQTT розрізняють 3 об'єкти:

Видавець (*Publisher*) — MQTT, який під час виникнення відповідної події передає брокеру інформацію про неї, публікуючи відповідні топіки;

Брокер (*Broker*) — MQTT-сервер, який отримує інформацію від видавців та передає її відповідним підписникам, окрім цього в складних системах може виконувати різні операції, пов'язані з аналізом та обробкою отриманих даних. Різні брокери можуть з'єднатися між собою, якщо вони підписуються на повідомлення одне одного;

Підписчик (*Subscriber*) — MQTT-клієнт, який після підписки до брокера переважно «слухає» його та постійно готовий до отримання та обробки вхідного повідомлення на необхідні йому топіки від брокера.

Тобто, коли один клієнт видавець передає повідомлення М на певну тему Т, усі клієнти, які підписалися на тему Т, отримують це повідомлення М. Наприклад, три клієнта підключені до брокера, клієнт Б та С підписуються на топик «temperature». В певний момент часу клієнт А передає значення «30» на топик

«temperature», миттєво після отримання, брокер передає це повідомлення до підписників.

В MQTT передбачається три вибори надійності обміну повідомленнями, які забезпечуються трьома рівнями якості обслуговування (QoS, Quality of Service):

QoS0 — повідомлення передається тільки один раз та не потребує підтвердження;

QoS1 — повідомлення надсилається мінімум один раз та потребує підтвердження;

QoS2 — для доставки повідомлення використовується механізм чотирьох етапного рукоштовування.

Крім цього, поверх рівня TCP присутній рівень безпеки TLS (Transport Layer Security), раніш відомий як SSL (Secure Socket Layer). Порт 8883 забезпечує безпеку зв'язку, якщо адреса брокера працює з цим портом, то трафік передається з шифруванням.

CoAP (*Constrained Application Protocol*) — протокол, розроблений IETF (*Internet Engineering Task Force*) та описан в документі RFC 7252 [6]. Протокол працює на прикладному рівні, та призначений для передачі даних по лініях з обмеженою пропускну здатністю. CoAP був розроблений на основі протоколу HTTP, представляє собою його бінарну версію, але не є його сліпою копією. CoAP складається з підмножини HTTP функціональних можливостей, які були розроблені з врахуванням низької потужності та споживання енергії вбудованих пристроїв. Крім цього, були змінені різні механізми та додані деякі нові можливості, щоб протокол підходив для Інтернет речей.

На відміну, від протоколу HTTP, який є текстовим та використовує TCP, CoAP — бінарний протокол, який транспортується через UDP, що зменшує розміри службових даних та збільшує гнучкість в моделях зв'язку.

CoAP організований в два рівня: рівень транзакцій та рівень «Request / Response». Рівень транзакції обробляє єдиний обмін повідомленнями між кінцевими точками. Повідомлення обміну на цьому рівні можуть бути чотирьох типів:

«Confirmable» — вимагає підтвердження;

«Non-confirmable» — не вимагає підтвердження;

квитування — підтверджує отримання «Confirmable» повідомлення;

«Reset» — вказує на те, що «Confirmable» повідомлення було отримано, але контекст, потребує обробки.

Перерахованими повідомленнями CoAP забезпечує механізм власної надійності. Коли отримувачу приходиться «Confirmable» повідомлення, він завжди повертає підтвердження. Сторона, яка надіслала повідомлення, в свою чергу, знову надсилає повідомлення, якщо підтвердження не повертається протягом певного періоду часу, заданого за замовчуванням та постійно зростає, доки отримувач не надіслася підтвердження отримання. Крім цього, це дає можливість асинхронного зв'язку, який є ключовою вимогою до Інтернет речей. Але деякі повідомлення не потребують підтвердження. Це особливо вірно по відношенню до повідомлень, які регулярно повторюються, наприклад однакові значення від датчику.

Тоді в якості більше легкої альтернативи, повідомлення передається з меншою надійністю, відмічене як «Non-confirmable». Це повідомлення завжди несе запит або відповідь та не повинне бути порожнім. А також, рівень транзакції забезпечує підтримку багатоадресної передачу та контролю перезавантаження. Таким чином CoAP — приклад передачі «один до одного», проте як зазначалося раніше, протокол підтримує багатоадресне надсилання, що можливо завдяки розташуванню над IPv6. Це може бути використано, наприклад, для виявлення пристроїв, та обміну даними через між мережеві екрани. Рівень «Request / Response» представляє модель взаємодії «запит / відповідь» або «клієнт / сервер» для маніпулювання ресурсами та передачі. В CoAP підтримується шифрування, але без TCP стандартний TLS не може бути використаний для забезпечення безпеки зв'язку. Тому в CoAP використовується DTLS (Datagram Transport Layer Security), більш нова похідна TLS, яка за рахунок додатків дозволяє йому працювати на верхині свого UDP транспортного протоколу.

Протокол HTTP/2 — оновлений протокол HTTP версії 2, який був розроблений IETF та описан в документі RFC 7540 [7]. Він повністю сумісний зі своїм попередником — HTTP/1.1, який в свою чергу не досить підходить для «речей», оскільки витрачає багато оперативної пам'яті та буферного простору. Крім цього, він витрачає більше енергії, із-за чого вистає проблема батарейного живлення. Нова версія протоколу HTTP/2 створена, щоб вирішити проблеми попередника.

HTTP/2 є бінарним протоколом, тобто потік ділиться на фрейми, які мають фіксовано структуру та розмір. Немає необхідності в повному зчитуванні для пошуку границь повідомлення. HTTP/2 надсилає бінарні фрейми, які розрізняють декілька типів, але у всіх однакова будова: тип, довжина, прапори, ідентифікатор потоку та корисне навантаження фрейму. Бінарний формат допомагає зменшити розмір кінцевого пакету. В специфікації HTTP/2 існує десять різних типів фреймів, але найбільш важливими, які зв'язують з HTTP/1.1 є: DATA (дані) та HEADERS (заголовки).

Одне з'єднання включає в себе протокол мультиплексування, тобто протокол дозволяє мультиплексування декількох з'єднань в одне з'єднання TCP. Мультиплексування потоків означає, що пакети з багатьох потоків змішані в рамках одного з'єднання. Два або більше окремих потоки даних збираються в один, а потім на іншій стороні розділяються. Ідентифікатор потоку прив'язує кожен фрейм, передаючи поверх HTTP/2. Потік — це логічна асоціація, незалежна двостороння послідовність фреймів, якими обмінюються клієнт з сервером всередині HTTP/2 з'єднання. В одному з'єднанні можливо розмістити багато одночасно відкритих потоків від будь-якої сторони, клієнта або сервера. Потоки можуть бути встановлені та використані в односторонньому порядку, та можуть бути зачинені з будь-якої сторони. Завжди важливий порядок потоків, в якому надсилаються фрейми. Отримувач або клієнт обробляє їх в порядку отримання.



Протоколи MQTT та CoAP передбачаються для зв'язку шлюзу к серверу. На даний час, численна кількість протоколів використовується для цих цілей, але наведені вище протоколи отримали найбільшу розповсюдженість під час розробки Інтернет речей. Також можливо ефективне використання CoAP та MQTT, коли необхідно надсилати короткі повідомлення. Протокол HTTP/2 більш передбачає використання для «веб речей» (WoT, *Web of Things*) [8]. Отже, визначимо основні відмінності між протоколами MQTT, CoAP та HTTP/2 в табл 1 [9].

Для даної статті був розроблений демонстраційний стенд. Реалізація протоколів: MQTT, CoAP та HTTP/2 була представлена з використанням open-source проєктів, а саме mosquitto, node-http2 та lib-coap, відповідно, які були інтегровані за допомогою спеціалізованого ПО для подальшого проведення експерименту. Також була використана програма WireShark для перехвату та аналізу трафіку.

В експерименті, кожні дві секунди клієнт надсилав одне повідомлення на сервер. Наприклад, повідомлення з поточною температурою повітря ({"temp": "25"}), яка вимірюється за допомогою датчика BME280 від компанії Bosch [10]. Цей показник передається від датчика через пристрій на сервер. Відповідно з використанням протоколів: MQTT, CoAP, HTTP/2, між ними на транспортному рівні забезпечується з'єднання на основі TCP або UDP протоколів.

Для того, щоб кількісно оцінити об'єм передачі даних під час використання протоколів, було проаналізовано транзакції клієнт-сервера та кількість переданих байтів. табл. 2 демонструє кількість байтів та пакетів, які передаються за одну транзакцію для MQTT, CoAP та HTTP/2. Транзакція починається, коли клієнт надсилає дані, та закінчується, коли сервер отримує дані або, у деяких випадках, під час отримання клієнтом підтвердження.

Виходячи з показників в табл. 2, транзакція HTTP/2, хоч і використовує технологію стиснення заголовків HPACK, все одно включає значно більше байтів та пакетів. Протоколи MQTT та CoAP мають коротку довжину заголовку. Але CoAP на транспортному рівні використовує UDP, тому має менший розмір пакета, на відміну від MQTT. Після інкапсуляції в заголовках рівня TCP та UDP, MAC пакет цих

протоколів може бути переданий в один кадр MAC, який має розмір 80 байтів.

Повідомлення ділиться на дві частини: корисну інформацію та службову. Ці частини впливають на витрати ресурсів каналу та енергії батарейного живлення. Для покращення ефективності потребується зниження службової інформації. В табл. 3 наведено відношення службової інформації до корисної в відсотках під час передачі одного повідомлення.

Протоколи MQTT та CoAP з QoS0 — службові поля в пакеті займають незначний об'єм, тому під час сеансу зв'язку витрачається мала кількість енергії. Інтернет речей зазвичай передає дані через радіоэфір, в нашому випадку через Wi-Fi, тому проблема енергоспоживання буде важлива для збільшення життєвого циклу пристрою. Для протокола CoAP можливо встановити режим роботи сервера, коли при необхідності оновлення даних створюється запит та датчик надсилає нові значення. Таким чином, вдається уникнути постійної передачі даних та неефективної витрати енергії. Такий варіант підходить для пристроїв з обмеженими ресурсами.

На рис. 1 наведені результати експериментального дослідження величини затримки під час передачі повідомлення. Видно, що у протокола CoAP спостерігається стабільно невелика затримка. CoAP використовує протокол транспортного рівня UDP, який дозволяє швидко оброблювати дані та передає пакет невеликої довжини, що зменшує надлишковість в каналі передачі.

Проте, виникає ситуація, коли з'єднання клієнт-сервер не стабільне. Зазвичай, така ситуація виникає, коли за період часу — декілька годин клієнт надсилає дані з повідомленнями різної довжини. На рис. 2 наведено залежність втрат пакетів в залежності від їх розміру. На графіку видно, що під час збільшення розміру повідомлення, відсоток втрат пакетів зростає. Варто зазначити, що вірогідність втрати у протокола CoAP більше, ніж у протоколів MQTT та HTTP/2, що зумовлено використанням транспортного протоколу UDP, який не гарантує доставку повідомлення. Також варто врахувати, що протокол MQTT ми розглядаємо для трьох різних типів надійності (QoS0, QoS1, QoS2). Згідно типам надійності бачимо, що чим більшу ступінь надійності ми присвоюємо повідомленню (QoS2), тем менша вірогідність втрати.

Таблиця 1 – Основні відміни в протоколах MQTT, CoAP та HTTP/2

Протокол	MQTT	CoAP	HTTP/2
Транспортний рівень	TCP	UDP	TCP
Безпека	TSL/SSL	DTLS	TLS/SSL
Обмін повідомленнями	Публікація/Підписка	Запит/Відповідь	Запит/Відповідь
Надійність	3 типи: QoS0, QoS1, QoS2	2 типи: Confirmable, Non-confirmable	немає

Таблиця 2 – Байти, передані за одну транзакцію клієнт-сервер

Протокол	MQTT (QoS0)	MQTT (QoS1)	MQTT (QoS2)	CoAP	HTTP/2
Байти за одну транзакцію	75	135	255	162	1149
Пакети за одну транзакцію	1	2	4	2	10

Таблиця 3 – Відношення корисної інформації до службової в одному повідомленні

Протокол	MQTT (QoS0)	MQTT (QoS1)	MQTT (QoS2)	CoAP	HTTP/2
Корисна інформація, %	16,8	16,5	16,5	15,3	10,9
Службова інформація, %	83,2	85,5	85,5	84,7	89,1

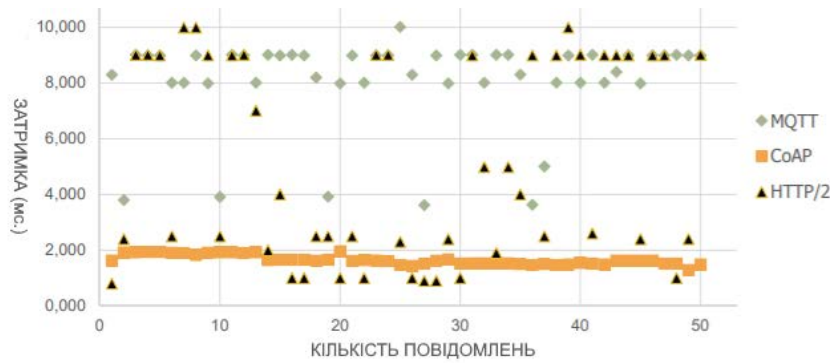


Рис. 1. Затримки під час надсилання даних від клієнта до сервера

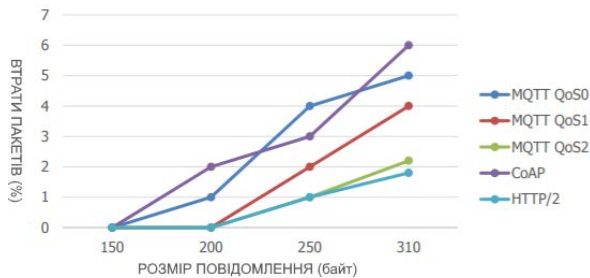


Рис. 2. Графік впливу розміру повідомлення на втрати пакетів

### Висновок

У статті розглянуто найбільш популярні протоколи Інтернету речей: MQTT, CoAP, HTTP/2, які використовуються для відправки інформації від датчика до хмарного сервісу. В ході дослідження виявлено, що для протоколів MQTT та CoAP характерні менші накладні витрати на передачу даних (у зв'язку з невеликою кількістю службового трафіку) і меншої смуги пропускання, у порівнянні з протоколом HTTP/2. Дані протоколи добре адаптовані для мало-

потужних пристроїв Інтернет речей на базі мікроконтролерів. Для своєї роботи протокол MQTT не вимагає постійного з'єднання між клієнтом і сервером, також, як і протокол CoAP, на відміну від протоколу HTTP/2.

Експериментальні результати продемонстрували, що ефективність розглянутих протоколів залежить від різних умов мережі зв'язку. Найбільш оптимальним є протокол MQTT, в якому можливо задавати параметри, що відповідають за надійність доставки повідомлень. Протокол HTTP/2 за умови, що мережа зв'язку працює стабільно буде більш оптимальним для «веб речей» — інформація доставляється швидко і може бути відображена в мобільних додатках або на персональних комп'ютерах.

У зв'язку з цим, в даний час вибір протоколів для пристроїв в залежності від умов експлуатації допомагає вирішити задачу економії ресурсів як енергоспоживання, так і гарантованої доставки. Особливо це актуально у зв'язку з розповсюдженням технології Інтернет речей та збільшенням загальної кількості «речей».

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Roslyakov A. V., Vanyashin S. V., Grebeshkov A. Yu., Samsonov M. Yu. The Internet of Things // Edited by A. V. Roslyakov. Samara: PSUTI, Ltd «Publishing House Asgard», 2014. 340 p.
2. Koucheryavy A. E. The internet of Things // *Elektrosvyaz*'. 2013. No 1. pp. 21–24.
3. Koucheryavy A. E. Self-Organizing Networks and New Services // *Elektrosvyaz*'. 2009. No 1. pp. 19–23.
4. Perry Lea. IoT and Edge Computing for Architects 2nd edition / Lea Perry – Packt Publishing, 2020. – 632 p.
5. Gaston C. Hillar. MQTT Essentials – A Lightweight IoT Protocol / C. Hillar Gaston – Packt Publishing, 2017. – 280 p.
6. RFC 7252 – The Constrained Application Protocol (CoAP) – Режим доступу: <https://tools.ietf.org/html/rfc7252>, 07.02.2020.
7. RFC 7540 – Hypertext Transfer Protocol Version 2 – Режим доступу: <https://tools.ietf.org/html/rfc7540>, 07.02.2020.
8. Castellani A. P., et al. Architecture and Protocols for the Internet of Things: A Case Study. In Proceedings of First International Workshop on the Web of Things (WoT). – 2010.
9. Philip N. MQTT and CoAP: Underlying Protocols for the IoT. – Режим доступу: <https://electronicdesign.com/iot/mqtt-and-coap-underlying-protocols-iot>
10. Malokhvii E. Library for Bosch Sensortec BME280: combined temperature, pressure, humidity sensor. – Режим доступу: <https://github.com/malokhvii-eduard/arduino-bme280>

Received (Надійшла) 05.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.03.2022

### Research of data transmission protocols in the conditions of the Internet of Things

E. Malokhvii, H. Molchanov

**Abstract.** The subject of research in the article is the are the protocols of data transmission in the conditions of the Internet of Things. The purpose of the work is to compare protocols of the Internet of Things on the basis of a demonstration stand. The WeMos D1 module is considered as a hardware platform, which uses Wi-Fi data transmission technology, which is the most common today for Internet of Things devices. During the experiment, are determined delays, packet loss depending on their size, the ratio of service information to useful information per transaction. All measurements are made using protocols: MQTT, CoAP, HTTP/2; in order to determine in which kind of devices the protocols are most effective.

**Keywords:** Internet of Things, protocol, MQTT, CoAP, HTTP/1.1, HTTP/2.

V. Martovytskyi<sup>1</sup>, Y. Koltun<sup>1</sup>, D. Holubnychy<sup>2</sup>, V. Sukhoteplyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

## TECHNOLOGY FOR MONITORING THE FUNCTIONING STATE OF DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEMS

**Abstract.** Understanding the state of the system is important to ensure the reliability and stable operation of applications and services. The article presents the functioning process of technology of the multi-agent anomaly monitoring system, that is based on the IDEF0 methodology, describes the DCS state monitoring process and allows to integrate the monitoring system with other components of the information security system. The results of the software package of the research prototype of the DCS anomaly monitoring system are presented. The effectiveness of the developed monitoring system is confirmed by the method of simulation of attacks on the segment of the DCS network. The prototype provides a probability of making the right decision about the presence of abnormal traffic at the level of 97%, errors of the type I - 2% and errors of the type II - 1%

**Keywords:** IPS, IDS, networks, monitoring, distributed computer systems, multi-agent system.

### Introduction

Understanding the state of infrastructure and systems is important for the stable operation of services. Deployment and performance information not only helps the team respond to problems in a timely manner, but also enables them to confidently make all necessary changes. One of the best ways to obtain this information is with a robust monitoring system that collects system metrics, visualizes data, and alerts operators to cyber influences on a computer system.

The network infrastructure monitoring systems are undergoing radical changes caused by the escalation of competition in the market, increasing requirements for the quality of security, technical re-equipment of communication networks, changes in the nature of traffic distribution [1]. All this leads to the need to control a large number of operation parameters of different technologies' networks [2].

The monitoring system not only changes the perception of the operating system, moving from collecting data parameters of individual stations to the operating parameters of the entire network, but also automates many routine processes for collecting and processing the parameters of a distributed computer system. The analysis of this information makes it possible to identify various cases of threats and violations, such as [3]:

- unauthorized connection to the network, missed by the classic means of perimeter protection (IPS / IDS);
- spread of viruses and spyware not detected by regular antivirus tools;
- incorrect actions when using the resources of distributed computer systems. For example, large-scale downloads from torrent trackers, access to network segments that are not accessible, attempting to access confidential information, etc.;
- new devices connecting to network and their behavior;
- errors in the operation of equipment;
- the emergence of "bottlenecks" in the network and other possible violations.

The architecture of the monitoring system of parameters obtained from sensors is characterized not only by their target functions, but also by functionalities that ensure the implementation of target functions, hierarchy and level of parallelism, homogeneity or heterogeneity of modular structure, organization of real-time information collection, data processing and network exchange of information with subscribers [4].

At the same time the following should be provided:

- non-interference of network equipment in the operation;
- constant collection of statistical information, which allows creating full-scale databases needed to analyze network parameters in real time [5];
- ensuring high speed processing of requests for the necessary information resources and services;
- collection, processing, storage of complete information about the state of all components of the telecommunications and information infrastructure of the network in real time, regardless of network architecture, type of switch and supplier;
- creation of a single standardized information center for storing data on the state of systems and networks.

Given the large number of events that accompany the process of diagnostic monitoring, the variety of types of events and devices in the open system being diagnosed, and the need for real-time operation given the high variability of the environment, the task of building diagnostic network monitoring should be considered big data processing. The solution to this problem is associated with the implementation of new paradigms for the development of software systems that support the possibility of distributed interaction of autonomous active devices in the process of solving a specific operational task.

The relevance of the research topic is that the current level of development of information technology and technologies allows creating devices and systems of different purposes and scales for a wide range of monitoring tasks. Monitoring of spatially distributed parameters involves significant use of network technologies, where impressive progress has also been made recently. This progress is

characterized by the following main trends: network specialization, changing the nature of network applications and shared use of different types of networks.

The relevance of the research topic is that the current level of development of information technology and technologies allows creating devices and systems of different purposes and scales for a wide range of monitoring tasks. Monitoring of spatially distributed parameters involves significant use of network technologies, where impressive progress has also been made recently. This progress is characterized by the following main trends: network specialization, changing the nature of network applications and shared use of different types of networks.

**Technology for monitoring the functioning state of distributed computer systems**

Understanding the state of the system is important to ensure the reliability and stable operation of applications and services. Deployment performance and productivity information not only helps the team respond to problems in a timely manner, but also enables developers to confidently make configuration changes. One of the best ways to get this information is a robust monitoring system that collects metrics, visualizes data, and alerts operators to failures.

Monitoring technology was developed to assess the state of the DCS using the multi-agent monitoring system presented in [3-4, 7].

This technology determines the conditions and procedure for assessing the state of the DCS using the developed multi-agent monitoring system. Assessment of the state of the DCS by this technology is the analysis of information about the state of the DCS to identify events

that do not correspond to the normal functioning of the DCS - cyber influences.

When conducting a study on the state of the DCS, it is necessary to use monitoring agents that analyze the components of the DCS for four groups of parameters: delay, traffic, error rate, saturation, and DCS events from several monitor the functioning of the DCS according to the stages presented in Fig. 1.

Based on the structure of the DCS and the list of available services within the DCS, monitoring agents are placed on the relevant elements of the DCS. Moreover, the administrator must decide on the placement of switch agents and network agent for communication equipment, they can be placed on work stations operating within the DCS, or on dedicated hosts.

After setting up the monitoring system, the agents start collecting data from different sources, converting them to a unified data format and storing them in an intermediate database. At set intervals, the agents transmit data from the intermediate database to the central database, which can act as a distributed database and contain configured replication to increase reliability. This in turn allows you to store copies of the same data on different nodes of the network to speed up search and increase resilience to failures. Next, the training module deployed on the dedicated host of the PC provides training for PC component state assessing model and PC state assessing models.

After training the relevant models, the data analysis models of each monitoring agent are set up, which allows to assess the state of individual PC components and generate events to further start the process of assessing the state of the system as a whole.

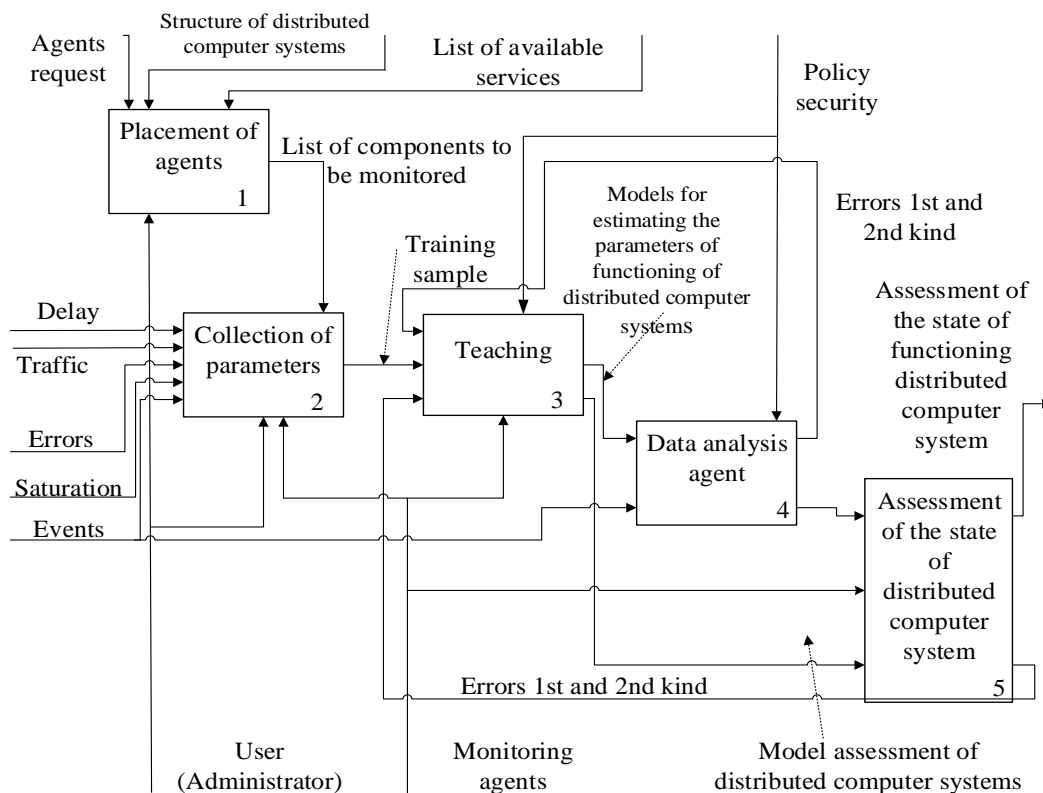


Fig. 1. IDEF1-diagram of the PC state assessing methodology using the developed multi-agent monitoring system

If the agent made a mistake of the 1st or 2nd kind, this information complements the training sample. In the case of a big number of such errors, the agent undergoes the procedure of retraining the PC component state assessing model. The same retraining procedure takes place with the PC state assessing model.

### Architecture of multi-agent monitoring system

The role of the monitoring system is the timely provision of relevant information to the operator of the computer system, both as a whole and for individual nodes of the controlled complex. Simple and quick access to this information allows you to respond in a timely manner to all negative changes in the system, to find the causes of problems and failures. The monitoring system can be a means of debugging and monitoring the behavior of running user programs, which allows real-time monitoring of system resources and identify bottlenecks in it.

To date, there are many strategies and tools for monitoring the components of PC, collecting important

data and responding to errors and changing conditions in different environments. But as software methods and infrastructure projects develop, monitoring must be adapted to meet new challenges and control parameters relative to unfamiliar territory.

The monitoring system not only changes the perception of the operating system, moving from collecting data parameters of individual DCS stations to the operating parameters of the entire DCS, but also automates many routine processes for collecting and processing parameters.

The architecture of MS designed to solve problems of collecting and storing parameters obtained from sensors, is characterized not only by its target functions, but also functionality that ensures the implementation of target functions, hierarchy and degree of parallelism, homogeneity or heterogeneity of modular structure, organization of information collection real-time, data processing and network exchange of information with subscribers [6]. To solve the above mentioned problems, the architecture of the monitoring system using stand-alone software agents was developed, which is presented in Fig. 2.

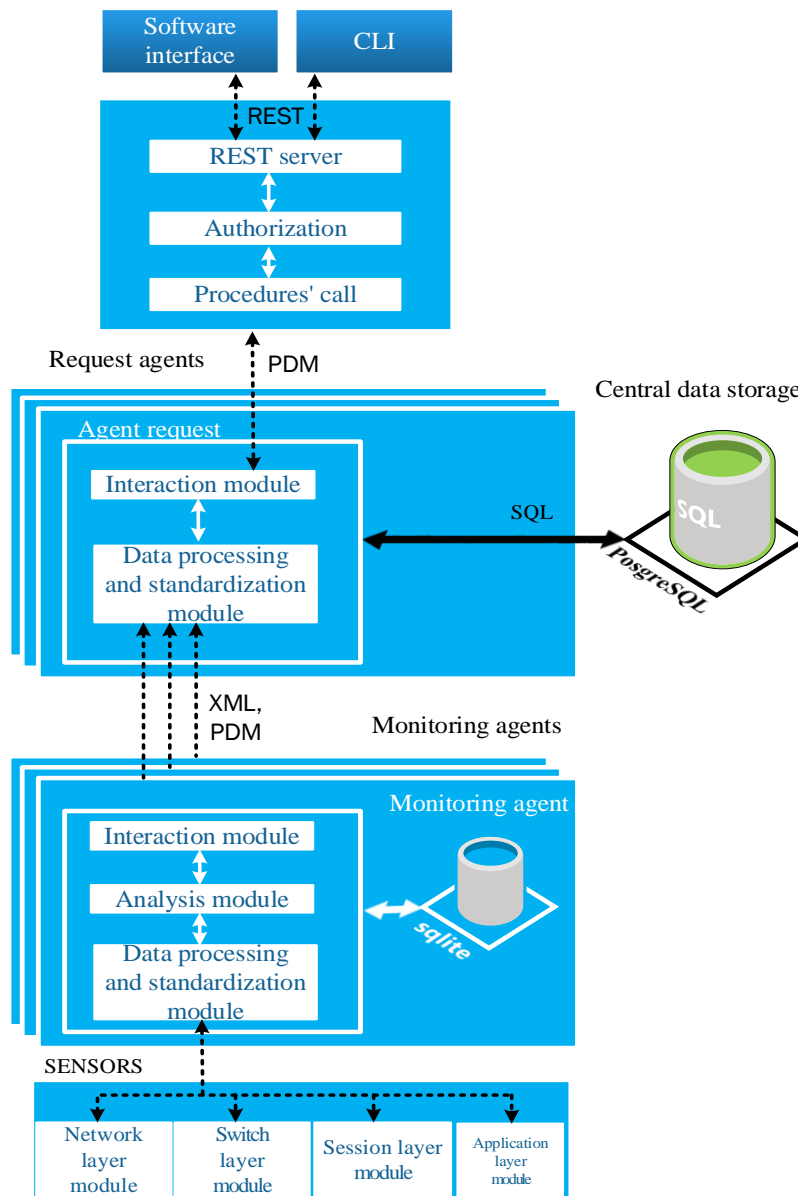


Fig. 2. Architecture system monitoring

The top-most module of the system is responsible for organizing user access to the system and displaying monitoring data in the form of graphs and a list of abnormal conditions to the user. Speed is not so important at this stage, because the software running in this module can run outside the computing complex, referring only to the data provided by the request agents.

The monitoring system stores the parameters of the DCS components, which are also called metrics. A metric is a necessary and sufficient set of characteristics of attributes and operations designed to describe the state of a component. For each specific component, the metric acquires specific set of characteristics' values.

The software package that implements the architecture must monitor the consistency of data over time. In practice, the metric stores only a set of data for a relatively short period of time and organizes effective access to them. The rest of the data collected from RAM in the intermediate data warehouse is transparently accessible to the user upon request.

Architecture involves the dynamic formation of a hierarchical structure, the node of which can be any entity defined by a data source or sensor. Thus, there may be DCS monitoring metrics for grid, clusters, computing nodes, and tasks.

For interaction between all agents, it is proposed to use a group of intelligent request agents whose purpose is to coordinate information collection agents, restructure the information obtained and implement protocols and messaging mechanisms between all agents of the model.

Functions of each information collection agent:

- Collection and accumulation of data in the intermediate storage of small volume;
- Real-time data processing;
- Adjustment of sampling intervals;
- Requesting to agents for additional measurements and a comprehensive analysis of the situation;

Monitoring agents can be divided into several groups.

A switch agent and a network agent that provide data collection from the first two levels described above. Since the operation of the channel and network layers is provided mainly by active network equipment and is usually implemented by the following components: network adapters, repeaters, bridges, hubs, switches, routers, to minimize interference with network equipment, these agents will work based on the SNMP protocol. MIB files will be used as intermediate data storage.

The task of these agents is to standardize data from files for further transmission to request agents. Agents are also tasked with managing the delivery of alarms, as the SNMP protocol works by the means of the unreliable UDP protocol [7].

Session agent that collects information about the user name, terminal line name, astronomical start time of the session, the duration of inactivity of the terminal line since the last exchange, the process ID of the shell command interpreter for each user running the system.

Depending on the operating system, intermediate storages may differ.

For example, for UNIX systems, such storages will be the system files `/etc/utmp`, `/etc/wtmp`, `/etc/inittab`.

The application agent is responsible for collecting data from various applications specific to a particular computer system.

Query agents aim to process requests to sample data from users of the collection system, coordinate other agents to collect the necessary information, and restructure the information obtained to store statistics about the system as a whole.

The introduction of such agents and the software implementation of standardized interfaces between them allow using independent developers' software at different levels. For example, sensors can be data files. However, all sensors form a single structure of metrics, equally accessible to different components of the MS.

Thus, the monitoring system built on this architecture can work in parallel with the already deployed monitoring tools, replacing them at some levels, which allows you to change and expand the set of available functions of these systems.

### **Automated workplace of the monitoring server administrator**

The software complex for monitoring of the DCS functioning is designed to monitor the condition of the components of the DCS, as well as elements of the network infrastructure. This complex allows monitoring security events and other events occurring at the nodes of the DCS network, as well as timely identifying problems with the nodes and promptly informing users about problems that arise during operation.

The monitoring software package consists of the following components:

- monitoring server - a software server that performs the following functions:

- collects and stores information on the current state of network nodes and other elements of the infrastructure of the DCS network;

- analyzes the values of the components states' parameters of the DCS and generates messages about the detected events;

- notifies system operators and administrators of changes in the status of monitoring objects and detected events, as well as provides API for interaction with external information systems.

- monitoring workstation - the workplace of the operator or administrator of the monitoring server, which allows you to manage monitoring agents through a secure channel. Data access and event notification of monitoring agents are accessed through graphical user interfaces.

- monitoring nodes - network elements, the status of which is monitored by monitoring agents.

- monitoring agent - a component of client software that is located on the monitoring node and provides collection and transmission of data on the status of the node to the monitoring server.

Objectives of the DCS functioning monitoring system:

- monitoring of distributed network nodes (determination of failures, security events and other events);

- monitoring of components, equipment and other parts of computer systems (determination of failures, security events and other events);

- monitoring of mobile devices and nodes of remote network users, regardless of the method of their connection to the communication network;

- monitoring of network infrastructure facilities (routers, switches and other components), peripherals, such as printers, MFPs that support the SNMP protocol.

To deploy the monitoring system, it is necessary to scan the elements of the network structure of the DCS, which sets the range of addresses to scan the active nodes of the network. After scanning the nodes using the "TCP SYN scan" method, the services running on each host are analyzed.

The next step in the deployment of the monitoring system based on the structure of the DCS and the list of available services within the DCS are monitoring agents. The result of the agent placement is shown in Fig. 3.

Query agents are shown in red, network agents in blue, switch agents that are hosted on the appropriate hosts on the network in yellow, session agents in green, and application agents in dark blue.

Then the monitoring system begins to monitor the parameters of the distributed computer system and displays information about suspicious malicious activity in the system.

It is worth noting the important prospects for the development of the proposed monitoring system. The developed prototype has good scalability and functional flexibility.

In addition, the prototype has the ability to embed as a kernel or add-on module in the system of protection against network attacks in systems, which are presented in the articles [8, 9].

The developed MS allows monitoring of DCS not only as a single computer system, but also of all its components separately, which makes it possible to comprehensively assess the state of the system as a whole.

Further research includes the continuation in the direction of studying new types of anomalies not only in the information and communication environment of DCS, but also anomalies in the operation of the system nodes, as well as improving system architecture, improving

efficiency and refining monitoring system algorithms using machine learning methods.

### Evaluation of the developed monitoring system efficiency

The efficiency of the proposed CM is evaluated only to detect abnormal behavior of network traffic based on the set of parameters of network connections {NW}, which is implemented by analyzing the incoming traffic using an ensemble of classifiers.

Then an experimental study of the effectiveness of the proposed model for detecting abnormal behavior was conducted, the results of which are given in table. 1.

Table 1 – Experimental study of the proposed model effectiveness in the presence of traffic anomalies

Number of tests	Number of correct decisions	Number of incorrect decisions	
		Errors of the type I	Errors of the type II
10000	9696	203	101

The tests were performed on a computing cluster deployed on training laboratory’s workstation under the influence of a slow DDoS attack and an attack over the entire time interval.

The number of tests was limited to 10,000 due to the fact that the results of the study after reaching this number of tests showed a steady trend. The probability of making the right decision about the presence of abnormal traffic was 97%, errors of the type I - 2% and errors of the type II- 1%.

Thus, the proposed model is effective for detecting anomalies in the functioning of the computing cluster.

These studies can be used to improve existing sub-systems for monitoring supercomputer technologies, as well as be the basis for creating a fundamentally new neural network multi-agent anomalous events detection monitoring system.

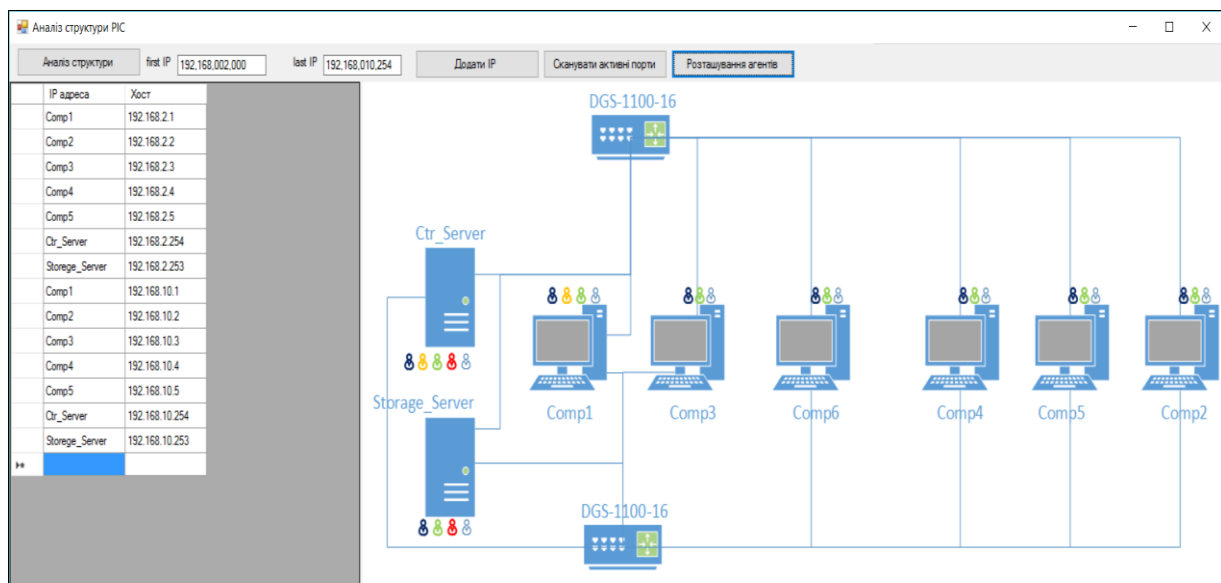


Fig. 3. Agents location by the components of a distributed computer system

## Conclusion

In the article is solved the actual scientific and practical problem of improvement of anomalies detection indicators of DCS functioning in the conditions of cybernetic influences of external and internal environment by construction of models and methods on the basis of technologies of data mining.

The structure and architecture of the monitoring system using autonomous software agents have been developed. The architecture of MS is designed to solve the problem of collecting and storing parameters obtained from sensors, characterized not only by their target functions, but also functionality.

The functioning process technology of multi-agent anomalies monitoring system while functioning DCS

components based on IDEF0 methodology is developed, detailing process of monitoring of DCS condition and allowing integrating monitoring system with other components of information protection system.

The results of the software package of the research prototype of the DCS anomaly monitoring system are presented. The effectiveness of the developed monitoring system is confirmed by the method of simulation of attacks on the segment of the DCS network. The prototype provides a probability of making the right decision about the presence of abnormal traffic at the level of 97%, errors of the type I - 2% and errors of the type II - 1%.

Further research should focus on improving and enhancing the method of assessing the state of the computing node and the state of running tasks in the computer system.

## REFERENCES

1. Mukhin, V., Kuchuk, N., Kosenko, N., Kuchuk, H. and Kosenko, V. Decomposition Method for Synthesizing the Computer System Architecture, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, AISC, vol. 938, pp 289-300, DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2\_27
2. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Mozhaiev, M., Kuchuk, H. Method for calculating of R-learning traffic peakedness 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017 – Proceedings, pp. 359-362, DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416
3. I. Ruban, V. Martovytskyi and N Lukova-Chuiko, Approach to Classifying the State of a Network Based on Statistical Parameters for Detecting Anomalies in the Information Structure of a Computing System, *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, no. 2, pp. 302-309, 2018.
4. I. Ruban, V. Martovytskyi and N. Lukova-Chuiko, Designing a monitoring model for cluster super-computer, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 84, pp. 32-37, 2016
5. Tkachov, Vitalii, et al. Overlay Network Infrastructure for Remote Control of Radio Astronomy Observatory, 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). IEEE, 2019
6. G. Kuchuk, A. Kovalenko, I.E. Komari, A. Svyrydov, V. Kharchenko Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
7. V. Martovytskyi, K. Smelyakov, D. Pribyl'nov, A. Chupryna Investigation of network infrastructure control parameters for effective intellectual analysis IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 20-24 Feb. 2018. – Pp. 983-986. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336359
8. Liashenko, O., Barkovska, O., Al-Atroshi, C., Datsok, O., Liashenko, S. Model of the work of the neurocontroller to control fuzzy data from the sensors of the climate control subsystem "smart house" *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(1), Pp. 70-74
9. Kovalenko A., Shamraev A., Shamraeva E., Dovbnya A., Ilyunin O. Green Microcontrollers in Control Systems for Magnetic Elements of Linear Electron Accelerators. *Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures. Studies in Systems, Decision and Control series*. Springer International Publishing Switzerland, 2017. Pp. 283-305. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7\\_15](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7_15)

Received (Надійшла) 24.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.02.2022

## Технологія моніторингу стану функціонування розподілених комп'ютерних систем

В. О. Мартовицький, Ю. М. Колтун, Д. Ю. Голубничий, В. М. Сухотеплий

**Анотація.** В статті представлена актуальна науково-практична задача покращення показників виявлення аномалій функціонування розподілених комп'ютерних систем в умовах кібернетичних впливів зовнішнього та внутрішнього середовища. Представлена структура та архітектура системи моніторингу з використанням автономних програмних агентів. Архітектура системи моніторингу призначена для вирішення завдань збору та зберігання параметрів отриманих від датчиків, що характеризуються не тільки їх цільовими функціями, але і функціональними можливостями. Розроблено технологію процесу функціонування мультиагентної системи моніторингу аномалій при функціонуванні компонентів розподілених комп'ютерних систем, що базуються на методології IDEF1, що деталізують процес моніторингу стану розподілених комп'ютерних систем і дозволяють інтегрувати систему моніторингу з іншими компонентами системи захисту інформації. Представлено результати роботи програмного комплексу системи моніторингу аномалій функціонування розподілених комп'ютерних систем. Ефективність розробленої системи моніторингу підтверджена методом імітаційного моделювання атак на сегмент мережі розподілених комп'ютерних систем. Прототип забезпечує ймовірність прийняття вірного рішення про наявність аномального трафіку склало 91%, помилки першого роду - 5% і помилки другого роду - 4%. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення та покращення методу оцінки стану обчислювального вузла та стану запущених завдань в комп'ютерній системі.

**Ключові слова:** IPS, IDS, мережі, моніторинг, розподілені комп'ютерні системи, багатоагентна система.



І. К. Сисоєв, В. В. Гавриленко

Національний транспортний університет, Київ, Україна

## АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В ДОДАТКАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЇ

**Анотація.** В статті розглянуто адаптивний алгоритм балансування навантаження для додатків з використанням технології контейнеризації. Наведено теоретичні приклади реалізації такого алгоритму на основі багаторівневої системи. Приведено теоретичний опис роботи алгоритму на різних рівнях системи. Функціонування додатку розгорнутого за допомогою технології контейнеризації потребує обов'язкового використання синхронізатору, який в свою чергу повинен бути наділений оптимальним алгоритмом балансування для досягнення максимального використання доступних ресурсів. При цьому слід враховувати особливість запитів, які притаманні конкретному додатку, так і їх неоднорідність в часі, для цього пропонується ввести паралельну систему для обробки і статичного аналізу вхідних запитів. В статті наведені критерії, при досягненні яких такий алгоритм можна буде використовувати замість вже існуючих.

**Ключові слова:** синхронізатор, балансувальник навантаження, адаптивний алгоритм, контейнеризація, обчислювальний вузол.

### Вступ

Балансування навантаження (Load Balancing) застосовується для оптимізації виконання паралельних обчислень за допомогою паралельної обчислювальної системи, яка передбачає рівномірне навантаження обчислювальних вузлів.

При появі нових завдань програмне забезпечення, що реалізує балансування, має прийняти рішення про те, на якому обчислювальному вузлі слід виконувати обчислення, пов'язані з цією новою задачею. Балансування навантаження також передбачає перенесення частини обчислень з найбільш завантажених обчислювальних вузлів на менш завантажені [1].

**Постановка задачі.** В сфері створення високо навантажених додатків, що розгорнуті в хмарі, гостро стоїть питання максимально ефективного використання ресурсів, за які користувач постійно сплачує. Неefективність алгоритмів балансування призводить до часткового простою ресурсів. Реалізація більш досконалого алгоритму надасть можливість користувачам заощаджувати кошти на невикористаних ресурсах.

Реалізація такої паралельної обчислювальної системи вимагає розробки алгоритмів синхронізації об'єктів, які функціонують в різних вузлах обчислювальної системи. І навпаки, ефективність реалізації алгоритмів синхронізації залежить від збалансованості навантаження по вузлах обчислювальної системи.

Дисбаланс навантаження може виникнути з кількох причин:

- неоднорідність структури паралельного застосування, тобто різні запити процесу вимагають різних обчислювальних потужностей;
- неоднорідність структури обчислювального комплексу, тобто різні обчислювальні вузли володіють різною продуктивністю;
- неоднорідність структури взаємодії між вузлами обчислювальної мережі, тобто лінії зв'язку

між вузлами можуть мати різні характеристики пропускної спроможності [2].

На сьогоднішній день універсального методу боротьби з дисбалансом навантаження не існує.

**Аналіз літератури.** Методи балансування поділяють на статичні та динамічні.

**Статичне балансування** виконується до початку виконання паралельного додатка. При розподілі логічних процесів по процесорам використовується досвід попередніх виконань (так зване навчання на історичних даних). Однак розміщення логічних процесів по вузлах обчислювальної мережі попередньо може не дати позитивних результатів.

Це пояснюється тим, що:

- обчислювальне середовище, в якому відбувається виконання програми, може змінитися, тобто один або кілька обчислювальних вузлів можуть вийти з ладу;
- обчислювальний вузол, на якому виконується паралельне додаток, може бути зайнятий іншими обчисленнями;
- навантаження на обчислювальні вузли є непередбаченим (аномальна активність користувачів, DDoS атаки).

**Динамічне балансування** передбачає перерозподіл навантаження на обчислювальні вузли під час виконання програми. Для такого балансування використовують програмне забезпечення, яке визначає:

- завантаження обчислювальних вузлів;
- пропускну спроможність ліній зв'язку між вузлами;
- частоту вхідних запитів;
- ресурсоемність вхідних запитів;
- кількість і завантаженість обчислювальних вузлів.

Динамічні методи зазвичай застосовують, якщо час, необхідний на балансування, набагато менше часу виконання завдання [3]. Динамічна задача балансування зазвичай включає в себе не тільки розподіл навантаження по обчислювальним вузлам, а й,

з огляду на особливості алгоритму балансування, вибір оптимального числа обчислювальних вузлів. Балансування навантаження може виконуватися програмно або апаратно, централізовано або децентралізовано.

Алгоритм динамічного балансування визначає на який обчислювальний вузол адресувати запит під час роботи системи.

Такий підхід дозволяє реагувати на зміну стану додатку. Однак динамічне балансування тягне за собою додаткові витрати часу на збір статистичних даних про стан додатку, на аналіз даних і на прийняття рішень.

**Невирішені питання.** Ключовим завданням при створенні адаптивного алгоритму є реалізація механізму балансування, затрати на прийняття рішення якого були б значно меншими за типові запити на виконання. Від ефективності цього механізму буде залежати доцільність використання адаптивного алгоритму в перевагу існуючим.

**Мета статті.** Метою даної статті є формування науково-обґрунтованого підходу до створення адаптивного алгоритму балансування навантаження в системах з використанням технології контейнеризації, для подальших реалізацій реальних алгоритмів на основі теоретичних обґрунтувань.

### Виклад основного матеріалу

Контейнеризований додаток являє собою сукупність однакових контейнерів з екземпляром додатку. Екземпляри розподіляються за різними обчислювальними вузлами і функціонують паралельно. Розподіляються запити між обчислювальними вузлами таким чином, щоб завантаження обчислювальних вузлів була рівномірною.

Однак при виконанні паралельного додатка може виникнути конфлікт між збалансованим розподілом об'єктів по обчислювальних вузлах і низькою швидкістю обмінів даними між цими об'єктами. Деякі обчислювальні вузли можуть простоювати, в той час як інші будуть перевантажені, якщо комунікація між обчислювальними вузлами ведеться на низькій швидкості [4].

З іншого боку, витрати на комунікацію можуть бути великі для збалансованої системи. Саме тому метод балансування повинен бути підібраний таким чином, щоб обчислювальні вузли були завантажені рівномірно, а швидкість обміну даними між ними була оптимальною.

Балансування навантаження - це механізм, який використовується для розподілення завдання між обчислювальними вузлами. Балансування і перенесення навантаження використовують для підвищення продуктивності паралельної системи [5]. Через неоднорідність обчислювального середовища, один алгоритм може добре працювати в одній паралельній системі і погано в іншій.

В сучасних тенденціях розробки розподілених додатків спостерігається все більша практика використання хмарних середовищ для розгортання таких як (Azure, Google Cloud, Azure тощо) з застосуваннями технології контейнеризації.

При такому підході такі причин дисбалансу навантаження як неоднорідність структури обчислювального комплексу та неоднорідність структури взаємодії між вузлами нівелюються. За допомогою використання технології контейнеризації яка дозволяє розгортати обчислювальні вузли як незалежні один від одного контейнери які мають однакову, попередньо сконфігуровану обчислювальну потужність, досягається однорідність середовища для обчислення запитів. Всі контейнери підпорядковані одному вузлу синхронізатору (Load balancer - балансувальник навантаження) синхронізатор реалізує алгоритм розподілення навантаження на підпорядковані вузли. При використанні технології контейнеризації окрім розподілення навантаження синхронізатор також може додавати нові обчислювальні вузли або вимикати не задіяні для економії коштів. Кожен обчислювальний вузол розгорнутий в хмарі має певну вартість згідно моделі тарифікації провайдера хмарного середовища. Саме економія коштів стає додатковим стимулом для максимально ефективного використання наявних ресурсів і оптимальне додавання нових.

Тому для ефективного балансування навантаження необхідно щоб алгоритм максимально задовольняв двом критеріям:

- 1) максимально ефективне використання наявних обчислювальних вузлів;
- 2) оптимальний алгоритм додавання або вимикання обчислювальних вузлів.

Під ефективним використанням вузлів розуміється те, що ресурси обчислювального вузла мають бути використанні на 90-95 відсотків, тобто на нього повинно бути відправлено стільки операцій, скільки він зможе ефективно виконати без втрат в часі виконання операції.

Під оптимальним алгоритмом додавання вузлів розуміється – що синхронізатор повинен додавати новий вузол тільки тоді коли вже неможливо буде виконати операції на наявних вузлах без втрати в часі виконання операції.

Для досягнення заданих критеріїв пропонується розробка адаптивного алгоритму балансування який приймав би рішення на основі комплексного показнику ресурсоемності обчислювального вузла, тобто величини яка б характеризувала що 1 вузол може обробити N операції певного типу без втрати в часі виконання операції. Для цього нам потрібно визначити ресурсоемність нашого вузла в RPS (Requests Per Second - кількість запитів за одну секунду). Також визначити RPS для кожного типу запиту. Тип запиту визначається по його URI який є унікальним ідентифікатором запиту і гарантує що при правильній архітектурі додатку кожен запит по тому й самому URI буде використовувати приблизно однакову кількість ресурсів сервера. Точність визначення RPS для кожного запиту буде на пряму впливати на ефективність синхронізатора при додаванні або вимиканні обчислювальних вузлів.

Алгоритм розподілення запиту з одного обчислювального вузла на інший досить складний. Однак введення деяких припущень може знизити складність цього алгоритму. нехай:

- розподілена система об'єднує кілька різних типів даних (є гетерогенною);
- користувач може інтерактивно взаємодіяти з машиною в будь-який момент часу;
- кількість обчислювальних вузлів в мережі контролюється тільки синхронізатором без втручання користувача в повністю автоматичному режимі;
- можлива зміна обчислювальної мережі;
- затримки на обмін даними між вузлами залишаються незмінними.

Для реалізації алгоритму пропонується реалізувати тривірневу систему прийняття рішень і збору даних.

**На першому рівні** пропонується наділити синхронізатор можливістью збирати і обробляти статистичні дані по навантаженням від самих вузлів так активувати паралельний процес прогнозування вхідного навантаження в залежності від вхідного навантаження.

Також синхронізатор повинен провести оцінку вхідного запиту для визначення його ємності на основі статистичних даних для прийняття рішення про адресацію цього запиту на існуючий обчислювальний вузол, якщо ємність вузла достатня для виконання запиту, або адресувати запит на нещодавно створений ввійходячи з донних отриманих від системи прогнозування обчислювальний вузол.

**На другому рівні** пропонується створити систему прогнозування навантаження яку б задіяв синхронізатор відправляючи їй паралельно вхідні запити та данні від обчислювальних вузлів про затрачену ємність на виконання ємність.

В життєвому циклі додатку навантаження в часі в основному не однорідне а його піки часто спів-

падають с піками активності користувачів або заздалегідь запланованими піковими активностями, система прогнозування цих навантажень дасть нам можливість не створювати додаткові обчислювальні вузли в реальному часі, а додавати їх за декілька хвилин до того як додатковий обчислювальний вузол нам знадобиться.

**На третьому рівні** пропонується при створенні нового контейнеру розгортати додатковий агент разом з обчислювальним вузлом який в фоновому режимі збирав би данні по вхідних запитах і ресурсах витрачених на його обробку.

Відправка цих донних на синхронізатор, необхідна для точного визначення ємності запиту, збір цих донних пропонується перенести на сторону обчислювальних вузлів для зменшення навантаження на синхронізатор щоб максимально скоротити час прийняття рішення, так як збір статистики на фоновому рівні не повинно забирати багато ресурсів у обчислювального вузла.

## Висновки

В результаті реалізації такого алгоритму очікуються досягнути переваг, які дозволять використовувати таку систему замість існуючих підходів і алгоритмів.

**По-перше**, ресурси, що витрачені на прийняття рішень, не повинні бути більшими за ресурси, які необхідні на виконання цього запиту.

**По-друге**, доступність додатку має бути на рівні 99.99% без втрати швидкодії при додаванні або вимиканні нових обчислювальних вузлів.

**По-третє**, наявність незадіяних вузлів та вузлів з частковою завантаженістю повинна бути мінімізована.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Andrey Vladimirov, Ryo Asai, Vadim Karpusenko. Parallel Programming and Optimization with Intel Xeon Phi Coprocessors, 2015.
2. Load Balancing in Parallel Computers. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.inspirenignite.com/load-balancing-in-parallel-computers/>
3. Maurice Herlihy, Nir Shavit, Victor Luchangco, Michael Spear. The Art of Multiprocessor Programming, 2020.
4. Christoforos N Hadjicostis, Alejandro D Dominguez-Garcia, Themistokis Charalambous. Distributed Averaging and Balancing in Network Systems, 2018.
5. Балансування навантаження у розподілених системах. Електронний ресурс. Режим доступу <http://intuit4.intuit.ru/studies/courses/1146/238/lecture/3287?page=1>

Надійшла (received) 23.12.2021

Прийнято до друку (accepted for publication) 16.02.2022

## Adaptive load balancing algorithm for applications using containerization technology

I. Sysoiev, V. Gavrilenko

**Abstract.** The article discusses an adaptive load balancing algorithm for applications using containerization technology. Theoretical examples of the implementation of such an algorithm based on a multilevel system are given. A theoretical description of the operation of the algorithm at different levels of the system is given. The operation of an application deployed using containerization technology requires the mandatory use of a synchronizer, which must be endowed with an optimal balancing algorithm to maximize the use of available resources. In this case, one should consider the peculiarity of requests that are inherent in a particular application, and their heterogeneity in time; for this, it is proposed to introduce a parallel system for processing and static analysis of incoming requests. The article provides criteria that, when some of the algorithms are achieved, can be used instead of the existing ones.

**Keywords:** synchronizer, load balancer, adaptive algorithm, containerization, compute node.

Т. В. Смірнова, Л. В. Константинова, С. А. Смірнов, Н. М. Якименко, О. А. Смірнов

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ЛІНІЙНОГО 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 дослідження є дослідження стійкості до лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах. Мета роботи полягає у дослідженні стійкості до лінійного 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 лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах. Проведене експериментальне дослідження підтвердило криптостійкість удосконаленого алгоритму до лінійного 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 можуть бути використані криптоалгоритми, стійкі до лінійного, диференціального, алгебраїчного, квантового та інших відомих видів криптоаналізу. Проведено дослідження стійкості до лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах. Проведене експериментальне дослідження підтвердило криптостійкість удосконаленого алгоритму до лінійного криптоаналізу.

**Ключові слова:** криптоаналіз, гешування, інформаційно-комунікаційні системи, захист інформації.

### Вступ

На сучасному етапі розвитку хмарних технологій, існує завдання захисту даних, які зберігаються у відповідних інформаційно-комунікаційних системах. За останній час проти України було реалізовано декілька криптоатак на різні хмарні сервіси, а саме:

– 14 січня 2022 р. – масована кібератака, у результаті якої постраждали 22 сайти органів державної влади. Шести сайтам було завдано значної шкоди, 70 – відключено за вказівкою Держспецзв'язку та Служби безпеки України [1].

– 15 лютого 2022 року – 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].

Аналіз цих криптоатак показав, що потребується розроблення нових або удосконалення існуючих механізмів захисту інформації. Одними з таких механізмів є програмні модулі криптографічного захисту даних, у яких необхідно реалізовувати 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

такі 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); кросплатформеність (КП). Наведемо результати цього порівняльного аналізу.

#### 1. MTProto 1.0 [16]:

– використовувані криптоалгоритми; SHA-256, AES-256.

– швидкість роботи (ШР) – висока;

– зручність для користувачів (ЗК) – висока;

– кросплатформеність (КП) – присутня частково.

#### 2. Signal Protocol [16]:

– використовувані криптоалгоритми; Curve25519, AES-256, HMAC, SHA-256;

– швидкість роботи (ШР) – середня;

– зручність для користувачів (ЗК) – висока;

- кросплатформеність (КП) – присутня.
- 3. TLS Skype [16]:
- використовувані криптоалгоритми; AES-256, RSA;
- швидкість роботи (ШР) – середня;
- зручність для користувачів (ЗК) – низька;
- кросплатформеність (КП) – присутня частково.

Таким чином з порівняльного аналізу розглянутих модулів захисту інформації можливо зробити висновок, що розглянуті програмні модулі мають низьку надійність 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; порядковий номер повідомлення; 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  $F_{enc}$ ;
- криптостійких методів гешування  $F_{hash}$ ;
- 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.

Областю застосування запропонованих підходів є хмарні системи які описані у [19, 20].

**Мета роботи** полягає у дослідженні стійкості до лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах управління технологічними процесами на базі хмарних технологій.

### Вимоги, особливості застосування і шляхи оптимізації сучасних криптосистем

Історично першими з'явилися симетричні криптографічні системи. У симетричній криптосистемі шифрування використовується один і той же ключ для зашифрування і розшифрування інформації. Це означає, що будь-який, хто має доступ до ключа шифрування, може розшифрувати повідомлення.

Для забезпечення необхідного рівня захисту інформації в інформаційних системах, до алгоритмів шифрування і системи ключів пред'являються деякі вимоги [4, 12, 16]:

1) криптограма (шифротекст) повинна дешифруватися лише за наявності ключа;

2) число операцій, необхідне для розтину ключа по відкритому тексту і відповідній йому криптограмі, має бути не менше числа всіх можливих ключів;

3) знання алгоритму шифрування не повинне спрощувати процедури дешифрування, що виконуються з метою розтину ключів і дешифровки криптограм;

4) незначна зміна ключа, з використанням якого шифрується відкритий текст, повинна приводити до істотної зміни відповідної криптограми;

5) незначна зміна відкритого тексту при незмінному ключі повинна приводити до істотної зміни відповідної криптограми;

6) структура алгоритму шифрування має бути постійною;

7) в процесі шифрування має бути передбачений контроль за шифрованим відкритим текстом і ключем;

8) довжина криптограми має дорівнювати довжині відкритого тексту;

9) складність розтину ключа, використовуваного для шифрування чергового відкритого тексту, по послідовності ключів, використаних для шифрування попередніх текстів, має бути порівнянною із складністю розтину ключа по відкритому тексту і відповідній йому криптограмі;

10) безліч всіх можливих ключів має бути однорідною і не повинно містити «слабких» ключів, стосовно яких процедури криптоаналізу відносно простіші і ефективніші;

11) криптограма має бути однорідною, тобто не повинна ділитися на фрагменти (символи, біти), одні з яких априорі (умоглядно або інтуїтивно) відомі як що відносяться до відкритого тексту, а інші – як включені в шифротекст в процесі шифрування;

12) алгоритм шифрування повинен допускати як програмну, так і апаратну реалізацію;

13) зміну довжини ключа не повинні погіршувати характеристики алгоритму шифрування.

Криптосистема, повинна задовольняти перерахованим вимогам, тільки тоді вона буде вважатися вважається криптостійкою і придатною для використання та для захисту інформації в інформаційних системах.

Умови перераховані вище є обов'язковими для надійних криптосистем.

Криптоалгоритми поза сумнівом є ядром криптографічних систем, але, як ми зараз побачимо, їх безпосереднє вживання без яких-небудь модифікацій для кодування великих об'ємів даних насправді не дуже підходить.

Всі недоліки безпосереднього вживання криптоалгоритмів усуваються в криптосистемах.

Криптосистема – це завершена комплексна модель, що здатна виробляти двосторонній криптопретворень над даними довільного об'єму і підтверджувати час відправки повідомлення, володіє механізмом перетворення паролів і ключів і системою транспортного кодування.

Таким чином, криптосистема виконує три основні функції [4, 12, 16]:

1. Посилення захищеності даних.
2. Полегшення роботи з криптоалгоритмом з боку людини.
3. Забезпечення сумісності потоку даних з іншими програмним забезпеченням.

Наступним удосконаленням, направленим на підвищення стійкості всієї системи в цілому є створення ключів сеансу.

Ця операція необхідна в тих випадках, коли виробляється часте шифрування схожих блоків даних одним і тим же ключем.

Наприклад, це має місце при передачі інформації або команд в автоматизованих системах управління, в банківських операціях і багатьох інших випадках передачі інформації, що має визначений заздалегідь відомий формат.

В цьому випадку необхідне введення якої-небудь випадкової величини в процес шифрування. Це можна зробити декількома способами:

1. Записом в початок файлу даних псевдовипадкової послідовності байт заздалегідь обумовленої довжини з відкиданням її при дешифровці – цей метод працюватиме лише при вживанні алгоритмів створення ланцюжків з пам'яттю (CBC, CFB, OFB).

2. Вживанням модифікованих алгоритмів створення ланцюжків, які при шифрування кожного блоку змішують з ним або а) фіксовану випадкову величину, прикріплену на початок зашифрованого файлу, або б) значення, що обчислюються за допомогою того ж шифру і ключа від заздалегідь обумовленої величини.

Створенням спеціально для кожного файлу абсолютного випадкового ключа, так званого ключа сеансу, яким і шифрується весь файл (сам же ключ сеансу шифрується первинним ключем, званим в цьому випадку майстром-ключем і поміщається на початку зашифрованого файлу).

### 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 такі дані:
  - повідомлення  $M$  ;
  - інформацію про ідентифікатор користувача та ідентифікатор сесії  $S$  ;
  - інформацію про час відправлення і довжину повідомлення  $ID$  ;
  - порядковий номер повідомлення  $PD$  .
 На виході отримуємо:
  - $mHash$  – геш значення:
 
$$DB (DB = (S, ID, M));$$
  - $EncP$  – 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, поточкових шифрів чи геш функцій тощо [10-12, 16].

4. У якості  $authKey$  , введено використання заздалегідь 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  $F_{enc}$  .

На рис. 1 наведена схема роботи удосконаленого модуля криптографічного захисту інформації, який описаний у роботі [16].

### 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 наступні етапи:

- Дослідження лінійних перетворень.
  - Дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу.
  - Дослідження стійкості до лінійного криптоаналізу.
  - Дослідження статистичної стійкості.
  - Дослідження 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  $r$  разів.

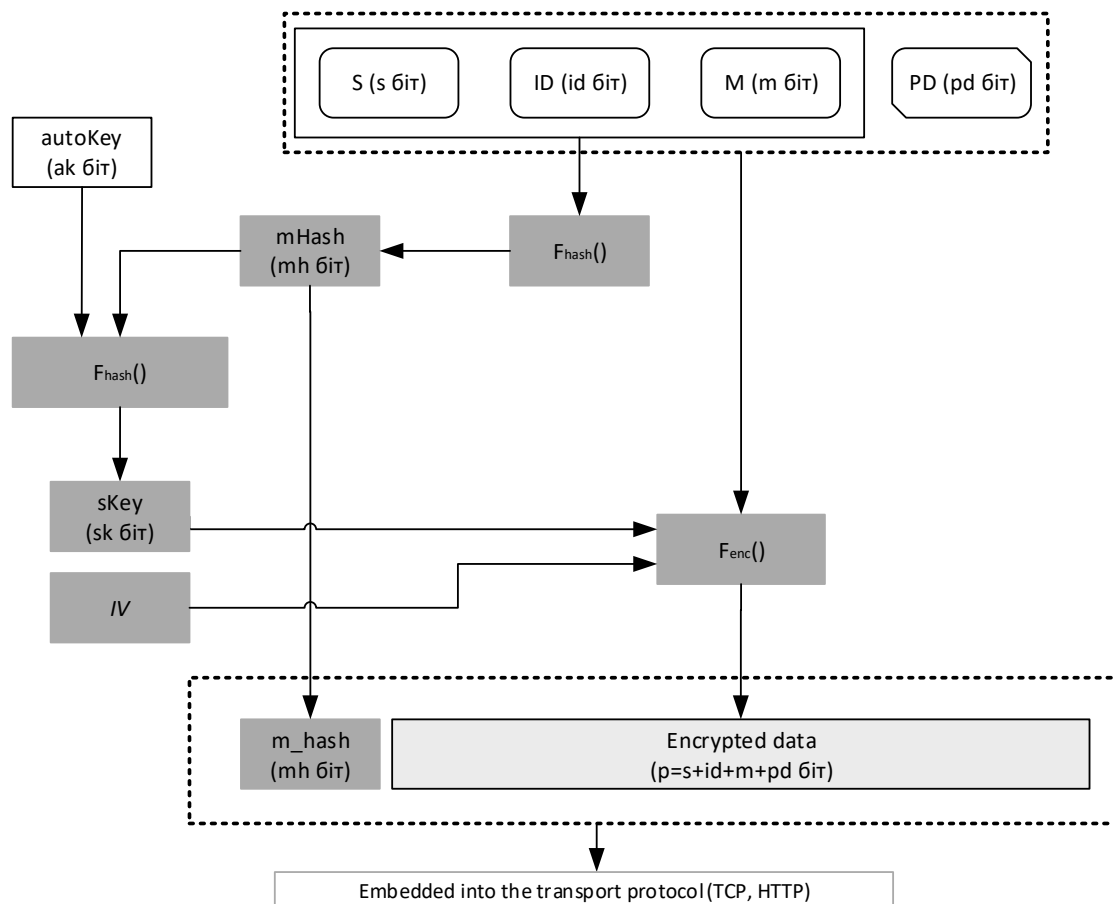


Рис. 1. Схема роботи удосконаленого модуля криптографічного захисту інформації [16]

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.

#### Дослідження стійкості до лінійного криптоаналізу.

Лінійний криптоаналіз винайшов японський криптолог М. Мацуї (Mitsuru Matsui) і з тих пір вважається одним з найбільш ефективних для сучасних блокових симетричних шифрів. Цей метод 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 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 порівняльного аналізу швидкісних характеристик прототипу (оригіналу криптоалгоритму) та удосконаленого методу перетворення інформації береться програмне забезпечення криптоалгоритму та створюється програмне забезпечення його модифікації.

Для проведення порівняльного аналізу швидкісних характеристик розробленого генератора криптографічних ключів з генератором ключів, що використовується в криптоалгоритмі та лінійно конгруентним генератором береться програмне забезпечення зазначених генераторів та створюється програмне забезпечення розробленого генератора криптографічних ключів.

Запускаючи 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 лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах

Дана робота присвячена дослідженню стійкості саме до лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах.

Для вираження результату проведення лінійного криптоаналізу аналогічно диференціальному використовується критерій стійкості до лінійного криптоаналізу, який для  $r$ -циклічного SPN – шифру може бути представлений у вигляді такої нерівності:

$$P_{\text{ДХ}}^{(r-1)} \leq 2^{-\frac{n}{2}},$$

де: число раундів;  $n$  – розмір блоку в бітах;  $P_{\text{ДХ}}^{(r)}$  – верхня границя імовірності  $r$ -циклічної лінійної характеристики.

Традиційний підхід до оцінки стійкості БСШ до лінійного криптоаналізу схожий на стійкості БСШ до диференційного криптоаналізу і складається з таких дій:

1. Розраховується таке мінімальне число активних підстановок у диференціальній характеристиці, яке буде покривати потрібне для організації ефектвної атаки число циклів.

2. Обчислюється верхня границя імовірності лінійної характеристики. Для цього використовуються два параметри:

- Кількість активних підстановок;
- Максимальна ймовірність лінійної апроксимації окремої підстановки.

Відбувається піднесення другого параметру до степеня першого, тобто:

$$P_{\text{ДХ}}^{(r)} = (P_{L_{\text{max}}})^{a^{(r)}},$$

де  $a^{(r)}$  – мінімальна кількість активних підстановок в  $r$  раундах шифру.

Параметр підстановки  $P_{L_{\text{max}}}$  розраховується за таким алгоритмом:

1. Побудова таблиці лінійних апроксимацій, що складається із значень:

$$s_s(a, b) = \#\{x \in GF(2^n) | (W(x \& a) + W(S(x) \& b)) \bmod 2 = 0\} - 2^{n-1}$$

для всіх варіантів  $a, b \in GF(2^n)$ , де:

- $a$  – різниця між вхідними даними;
- $b$  – різниця між даними після проходження  $S$ -блоків;
- $\&$  – побітова кон'юнкція;
- $W(x)$  – вага Хемінга вектора  $x$  (кількість одиничних бітів у цьому векторі);
- $\bmod 2$  – операція узяття за модулем 2.

2. Розрахунок максимальної імовірності лінійної апроксимації,  $P_{L_{\text{max}}}$  визначається за формулою:

$$P_{L_{\text{max}}} = \frac{\left| \max_{a \neq 0; b \neq 0} c_s(a, b) \right|}{2^{n-1}}.$$

Провівши аналіз  $S$ -блоку алгоритму NRC21, побудована таблиця лінійних апроксимацій.

За таблицею лінійних апроксимацій встановлено, що для всіх підстановок, які використовуються у шифрі NRC21  $P_{L_{\text{max}}} = 0,0234375$ .

Для розрахунку верхньої границі ймовірності для багаточислових лінійних характеристик для спрощеного шифру необхідно підставити у зазначену формулу  $P_{L_{\text{max}}} = 0,0234375$  та  $a^{(r)}$ .

У табл. 1 кольором показані осередки, які визначають число циклів, при якому ймовірність диференціальної характеристики знаходиться нижче граничного значення.

Таблиця 1 -- Визначення числа циклів, при якому ймовірність лінійної характеристики знаходиться нижче граничного значення

Розмір блоку, біти	Число циклів							
	1	2	3	4	5	6	7	8
128	2 <sup>-6</sup>	2 <sup>-50</sup>	2 <sup>-56</sup>	2 <sup>-149</sup>	2 <sup>-154</sup>	2 <sup>-198</sup>	2 <sup>-209</sup>	2 <sup>-297</sup>

Дані, що наведені в табл. 1, дозволяють зробити висновок про стійкість до лінійного криптоаналізу шифру NRC21 з 128-бітним блоком, що містить 5 і більше циклів (10 і більше раундів).

### 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 ІКСМ управління технологічними дуля важливим є вибір криптостійких методів шифрування процесами.

Для ефективного використання цього мо  $F_{\text{enc}}$  та гешування  $F_{\text{hash}}$ , а також синхронізація секретного ключа  $\text{authKey}$ . У якості функцій  $F_{\text{enc}}$  та  $F_{\text{hash}}$  можуть бути використані криптоалгоритми, стійкі до лінійного, диференціального, алгебраїчного, квантового та інших відомих видів криптоаналізу.

Проведено дослідження стійкості до лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах.

Проведене експериментальне дослідження підтвердило криптостійкість удосконаленого алгоритму до лінійного криптоаналізу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- <https://www.kmu.gov.ua/news/vid-kiberataki-14-sichnya-postrazhdali-22-derzhavnih-organi-derzhspecvvyazku>
- <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.



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. 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». *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. № 2(14). С. 176-185. 2021.
17. Смірнова Т.В., Поліщук Л.І., Смірнов О.А., К.О. Буравченко, А.О.Макевнін, «Дослідження хмарних технологій як сервісів», *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. № 3(7). С. 43-62. 2020.
18. Смірнова Т.В., Солових Є.К., Смірнов О.А., Дресєв 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.
19. 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.
20. 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.

Received (Надійшла) 23.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.02.2022

**Study of resistance to linear cryptanalysis  
of the proposed hashing function of an improved  
cryptographic protection module in information and communication systems**

Tetiana Smirnova, Liliia Konstantynova, Serhii Smirnov, Nataliia Yakymenko, Oleksii Smirnov

**Abstract.** The object of research is to ensure the confidentiality of data in information and communication systems for managing technological processes based on cloud technologies. The subject of the research is the study of resistance to linear 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 linear cryptanalysis of the proposed hashing function of an improved model of cryptographic protection 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. A study of resistance to linear cryptanalysis of the proposed hashing function of an improved cryptographic protection module in information and communication systems has been carried out. The conducted experimental study confirmed the cryptographic resistance of the improved algorithm to linear 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 encryption and hashing methods, 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 of the resistance to linear cryptanalysis of the proposed hashing function of an improved cryptographic protection module in information and communication systems has been carried out. The conducted experimental study confirmed the cryptographic resistance of the improved algorithm to linear cryptanalysis.

**Keywords:** cryptanalysis, hashing, information and communication systems, information security

О. А. Чуйко<sup>1</sup>, Д. О. Лисиця<sup>2</sup>, Г. А. Кучук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС КЕРУВАННЯ СЦЕНІЧНИМ ОСВІТЛЮВАЛЬНИМ ОБЛАДНАННЯМ

**Анотація.** Об'єктом дослідження є система керування сценічним освітлювальним обладнанням. Предмет дослідження та проектування – розробка та складання системи керування сценічними освітлювальними приладами. Мета роботи — проектування та виготовлення UDMX кодера для системи керування сценічними освітлювальними приладами, реалізація бездротової передачі команд у системі. Методи дослідження та розробки – розробка програмного забезпечення UDMX кодера, виготовлення UDMX кодера, прошивка UDMX кодера, складання програмно-апаратного комплексу керування сценічним освітлювальним обладнанням. В роботі виконується розробка конструкції UDMX кодера, розробка програмного забезпечення UDMX кодера, складання програмно-апаратного комплексу керування сценічним освітлювальним обладнанням, реалізація бездротової передачі команд у системі, виконуються економічні розрахунки собівартості і ціни проекту.

**Ключові слова:** обертові голови, розробка, стробоскопи, колорченджери, програмне середовище, мікроконтролер, протоколи керування, плата, схема.

### Вступ

Задача керування сценічними освітлювальними приладами існувала ще задовго до появи електроніки. Система устаткування, яка дозволяє оператору здійснювати передачу команд освітлювальним приладам, є обов'язковою складовою будь-якого шоу. З часом вдосконалювались як обладнання керування, так і пристрої, які регламентують передачу необхідних команд. Для керування сучасними освітлювальними приладами найчастіше використовується цифровий протокол DMX 512 (англ. Digital Multiplex), за допомогою якого можна реалізовувати складні освітлювальні проекти, регулювати різні параметри світла, створювати оригінальні спецефекти. Для того, щоб передача команд стала можливою, до персонального комп'ютера підключається спеціальний пристрій, DMX контролер (DMX кодер), який конвертує команди оператора згідно із необхідним протоколом передачі даних і надсилає до освітлювальних приладів. На даний момент спостерігається перехід DMX в середовище Ethernet у вигляді двох конкуруючих протоколів E1.31 і Art-Net.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Будь яка сучасна система керування сценічними освітлювальними приладами функціонує за однаковими принципами [1, 2]. Світлотехнік задає необхідні команди за допомогою пульта або спеціального програмного забезпечення на персональному комп'ютері, які передаються DMX-контролером згідно із певним протоколом передачі даних. Професійне програмне забезпечення для персонального комп'ютера дозволяє здійснювати керування освітлювальним обладнанням без вузьконаправленого спеціалізованого устаткування, лише за наявності DMX-контролера [3].

Більш цільовим видом DMX-контролера є DMX пульт (рис. 1), який поєднує функції контролера та MIDI-інтерфейса, має аудіо вхід і вбудований мікрофон з функцією синхронізації в такт музиці [4]. Він дозволяє здійснювати більш зручний прямий

контроль чи завантажувати вже розроблені алгоритми світлових сцен з персонального комп'ютера.



Рис. 1. DMX Пульт STLS PILOT 2000

Найскладнішими професійними контролерами із найширшим функціоналом є світлові консолі [5, 6] (рис. 2). Вони поєднують функції комп'ютера, інтерфейсу керування, та власне DMX-контролера.



Рис. 2. Світлова консоль MA LIGHTING GRANDMA2 LIGHT

Світлові консолі гідтримують величезну кількість каналів, що дозволяє виконувати керування 60000 параметрами в режимі реального часу (залежно від протоколу). Також світлові консолі мають власний функціонал проектування світлових сцен та

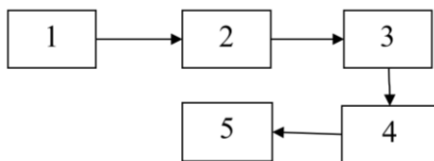
обладнані навіть вбудованим джерелом безперервного живлення.

Але більшість існуючих розробок не припускає поєднання бездротового інтерфейсу та інтерфейсу керування DMX, крім того стандартні системи керування сценічними освітлювальними приладами мають відносно велику вартість [7-10].

Тому **мета даної роботи** є проектування та виготовлення UDMX кодера для системи керування сценічними освітлювальними приладами, що реалізує бездротову передачу команд у системі та має відносно невелику вартість.

### Результати досліджень

Програмно-апаратний комплекс керування сценічним освітлювальним обладнанням є системою устаткування що дозволяє реалізовувати передачу команд оператора виконуючим освітлювальним приладам. Команди буде задавати оператор за допомогою програмного забезпечення персонального комп'ютера, далі комп'ютер буде передавати команди DMX-контролеру що закодує їх згідно із протоколом DMX-512. Команди будуть передаватись дистанційно за допомогою передавача Wi-fi сигналу, і будуть прийняті і виконані освітлювальним приладом, який буде обладнаний приймачем (рис. 3).



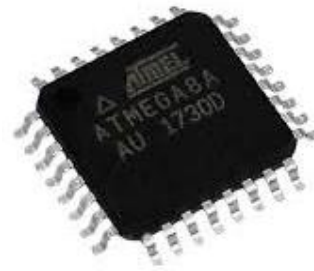
**Рис. 3.** Структурна схема програмно-апаратного комплексу керування сценічним освітлювальним обладнанням:

- 1 – програмне забезпечення персонального комп'ютера;
- 2 – DMX - контролер; 3 – передавач; 4 – приймач;
- 5 – освітлювальний прилад

Розглянемо процес розробки друкованої плати системи керування.

Першим кроком для розробки UDMX-контролера є створення принципової схеми пристрою. Виходячи із завдання, що передбачає роботу із персональним комп'ютером, необхідне підключення та живлення за допомогою USB. Мікроконтролер був обраний з обов'язковим урахуванням цієї задачі, а також його обчислювальної потужності має бути достатньо для обробки USB пакетів даних та їх передачі, за протоколом DMX, з урахуванням зберігання останнього пакета даних і швидкості відправлення згідно стандарту DMX. За цими характеристиками був обраний мікроконтролер Atmega8a-au (рис. 4).

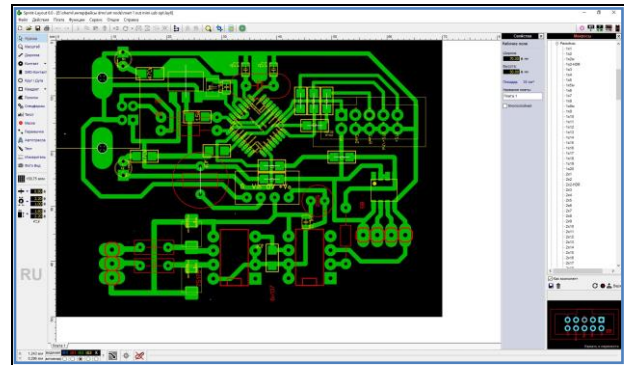
З урахуванням обраного мікроконтролера та бібліотеки роботи із USB була розроблена схема з'єднання USB. Також додано інтерфейсну мікросхему sn75176 (рис. 5) та роз'єм для підключення WIFI модуля. Для провідного підключення DMX обладнання було додано схему оптичної і гальванічної розв'язки з використанням dc-dc конвертора, з додаванням самовідновлюючихся запобіжників і супресорів. За принциповою схемою розроблено креслення друкованої плати за допомогою середовища Sprint (рис. 6).



**Рис. 4.** Мікроконтролер Atmega8a-au у корпусі 1730D

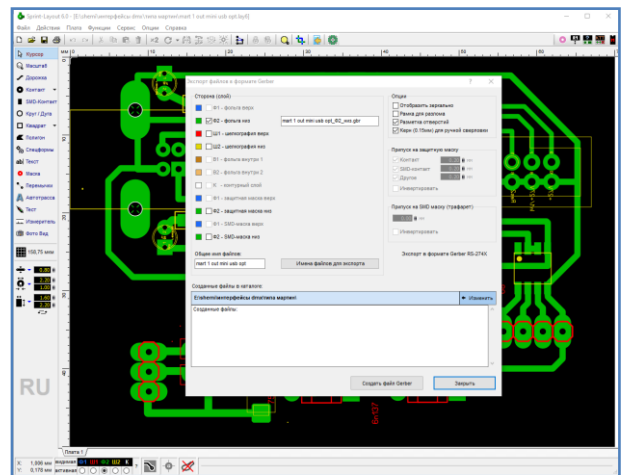


**Рис. 5.** Інтерфейсна мікросхема sn75176 у корпусі 1730D 6AAGT9M



**Рис. 6.** Креслення друкованої плати у середовищі Sprint

Наступним етапом роботи було переведення креслення у гербер файл(.grb) через опцію експорту в середовищі Sprint (рис. 7).



**Рис. 7.** Конвертація у формат grb у інтерфейсі середовища Sprint

Далі з гербер файлу проекту були переведені у G-код (рис. 8) для роботи із верстатом числового програмного керування (ЧПК). Потім був запущений процес прирівнення країв за розміром креслення (рис. 9). За допомогою функції «вибірка за профилем» було виставлено кордони проходу фрези з накісником 0,2мм та заточкою 30 градусів для вибірки текстоліту і мідної фольги з плати для формування доріжки (рис. 10). Після цього обирається функція «вибірка карману» і більш крупною фрезою вибираються залишки міді.



## Порівняння результатів розробки із існуючими рішеннями

Після закінчення розробки було проведено порівняння існуючих на ринку рішень із наведеною розробкою для визначення її доцільності після всіх етапів

проекування, та створення пристрою. Основна порівняльна характеристика, яка використовувалась – це ціна виробу по відношенню до його характеристик.

Розглянемо аналогічні ринкові пристрої, та порівняємо їх із власним виробом. Результати порівняння наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння існуючих пристроїв із власною розробкою

Назва	Ціна	Наявність бездротової передачі сигналу	Максимальна кількість команд	Можливість під'єднання до комп'ютеру
SUNLITE SUITE-2FC	5400 грн	Ні	1024	Так, П.3. Sunlite Suite 2
LightConverse-2048X	26 000 грн	Ні	2048	Так, П.3. LightConverse
New Light C-12W	1650 грн	Так, 2.4 кГц	1024	Ні
GrandMA2 Command Wing	32 700 грн	Ні	2048	Так, П.3. GrandMA on PC
Власна розробка	2884,46 грн	Так, 2.4 кГц	1024	Так, П.3. QLC Light + GrandMA on PC

За результатами порівняння отримаємо, що наша розробка має конкурентноспроможну вартість. Її основна перевага, на відміну від основних конкурентів, – це поєднання бездротового інтерфейсу, та інтерфейсу керування DMX.

Порівняння проводилося по таких критеріях:

- ціна,
- наявність бездротового каналу зв'язку,
- максимальна кількість команд,
- можливість підключення до комп'ютеру.

Варто зазначити, що власна розробка спроможна працювати із П.3. «GrandMA on PC» лише за допомогою П.3. «QLC Light», на відміну від наведеної у таблиці світлової консолі «GrandMA2 Command Wing», яка безпосередньо працює із П.3. «GrandMA on PC», але має значно вищу вартість.

## Висновки

У статті розглянуті переваги та недоліки керуючих пристроїв, також основні види сценічного освітлювального обладнання. На основі проведеного аналізу був обраний освітлювальний прилад і програмне забезпечення для складання повної системи програмно апаратного комплексу керування сценічним освітлювальним обладнанням. Розглянута структурна схема програмно апаратного комплексу керування сценічним освітлювальним обладнанням. Була проведена робота із розробки власного UDMX кодера і складання повної системи керування сценічними освітлювальними приладами. Реалізована можливість бездротової передачі команд освітлювальним приладам.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сценічне освітлення [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: [https://wikinew.wiki/wiki/Stage\\_lighting](https://wikinew.wiki/wiki/Stage_lighting)
2. Театральні прожектори [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: [https://luxpro.ua/ua/articles/198-vidi\\_i\\_osoblivosti\\_teatralnih\\_prozhektoriv](https://luxpro.ua/ua/articles/198-vidi_i_osoblivosti_teatralnih_prozhektoriv)
3. Протоколи [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://eurhythmic.com.ua/modern-lighting-control-protocols/>
4. Схеми на мікроконтролерах [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: [bezkz.su](http://bezkz.su)
5. Light Converse [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://lightconverse.ua>
6. MA Lighting International GmbH [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://www.malighting.com/>
7. Програмування [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: [chipenable.ru](http://chipenable.ru)
8. Передавач [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: [www.radiolibrary.ru](http://www.radiolibrary.ru)
9. Мікроконтролер [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: [easyelectronics.ru](http://easyelectronics.ru)
10. Martin Professional [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://www.martin.com>

Received (Надійшла) 04.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.03.2022

## Software and Hardware complex of stage lighting equipment control

Oleksandr Chuiko, Dmytro Lysytsia, Heorhii Kuchuk

**Abstract.** The object of research - Control system of stage lighting equipment. The subject of research and design is the development and assembly of a control system for stage lighting fixtures. The purpose of the work is the design and manufacture of UDMX encoder for the control system of stage lighting devices, the implementation of wireless command transmission in the system. Research and development methods - development of design documentation, manufacture of UDMX encoder, firmware of UDMX encoder, compilation of software and hardware complex control of stage lighting equipment. The work develops the design of the UDMX encoder, software development of the UDMX encoder, assembly of software and hardware control of stage lighting equipment, implementation of wireless command transmission in the system, economic calculations of the cost and price of the project.

**Keywords:** moving heads, development, stroboscopes, color changers, software environment, microcontroller, control protocols, board, scheme.

С. І. Шаповалова, О. С. Гулак

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## БЛОКЧЕЙН ТЕХНОЛОГІЇ В БАНКІВСЬКІЙ СФЕРІ

**Анотація.** Предметом дослідження в статті є реалізація проведення банківських транзакцій. Мета роботи – представлення рішення з проведення банківських транзакцій на основі технології Блокчейн. В статті представлено базові системи переказу коштів між банками, надано спрощену схему проведення транзакції, а також програмну систему на її основі. Отримано наступні результати: надано рішення з програмної реалізації проведення транзакцій між банками на основі запиту клієнта. Висновки: 1) запропоновано схему проведення транзакцій з розрахункових операцій без банків-посередників; 2) на основі проведеного аналізу існуючих методів досягнення консенсусу обґрунтовано використання методу PoW та використання алгоритму хешування SHA256; 3) розроблено програмну реалізацію проведення фінансових транзакцій на основі технології Блокчейн, яка дозволяє проводити більш безпечні, швидкі та дешеві операції переведення коштів. Перспективним напрямком подальших досліджень є розширення можливих операцій з надання банківських послуг на основі технології Блокчейн.

**Ключові слова:** Блокчейн, розподілений консенсус, Proof-of-stake, Proof-of-work, банківські транзакції.

### Вступ

На сьогоднішній день в банківських системах переведення коштів існує чимало недоліків. Насамперед це стосується забезпечення задовільного рівня безпеки цього процесу. Майже щодня особисті рахунки піддаються атакам хакерів. Крім цього для міжнародних переказів може знадобитися багато часу – до 3-7 банківських днів. Більшість переказів коштів потребують значних комісійних витрат, адже зазвичай грошові транзакції здійснюються через посередницьку структуру або організацію. Тому актуальним є вдосконалення програмного забезпечення проведення банківських операцій для підвищення безпеки та прискорення виконання транзакцій.

**Постановка проблеми.** Для переказу коштів між банками існує три базові системи.

#### 1. Система відкладених нетто-розрахунків.

Більшість країн має подібну систему, наприклад, у Великобританії такою системою є BACS [1].

У таких системах на початковому етапі повідомлення (або файли) потрапляють у центральну «клірингову» систему, яка відстежує всі платежі і потім у визначені терміни розраховує нетто-суму, яку кожен із банків повинен будь-якому іншому банку.

На наступному етапі банки проводять між собою розрахункові операції безпосередньо або застосовують систему RTGS (Real-Time Gross Settlement) [2]. Валові розрахунки передбачають виконання кожного платежу в індивідуальному порядку, без використання нетто-схем, які використовують різницю між вхідними і вихідними грошовими потоками.

#### 2. Система кореспондентських угод [3].

Така модель обробки платежів (і більш складних різновидів переказів) відома як діяльність банків з урахуванням кореспондентських відносин. Наявність кореспондентських відносин дозволяє банкам полегшити виплату платежів відповідним клієнтам.

#### 3. Система платежів SWIFT [4].

Мережа SWIFT дозволяє банкам безперешкодно обмінюватися електронними повідомленнями. Один із типів повідомлень, який підтримується ме-

режею SWIFT, – це MT103 [5]. MT103 надає можливість певному банку давати вказівки іншому банку, щоб останній перерахував суму на рахунок одного зі своїх клієнтів. У той час та сама сума списується з рахунку організації, що надсилає повідомлення. Тоді у банку, який приймає повідомлення, ця сума зараховується так, щоб усе врівноважувалося.

В кожній з існуючих систем присутні ризики контрагента, ліквідності та витрат. Найважливішою проблемою є забезпечення безпеки проведення транзакцій. Підвищити рівень безпеки можна завдяки використанню нових технологій обліку цифрових транзакцій в розподілених базах даних.

Технологія Блокчейн в значній мірі покладається на фундаментальні інструменти з криптології та безпеки даних, особливо з точки зору автентифікації транзакцій. Концепція Блокчейн унеможливує несанкціонований доступ, тим самим підвищує стійкість до хакерських атак. У своїй найбільш абстрактній формі Блокчейн можна представити як захищену від зломів реєстраційну книгу, де зберігаються записи транзакцій між вузлами [6]. Замість реалізації централізованої системи баз даних за технологією Блокчейн база даних реплікується, тобто розподіляється по мережі та синхронізується через Інтернет.

Блокчейн називають головною технологічною інновацією, оскільки він містить інформацію про усі транзакції мережі [7]. Блокчейн-технологія наразі не реалізована в достатній мірі в фінансових системах. Однак Блокчейн має потенціал для розповсюдження у фінансовому та банківському секторі шляхом впровадження однорангової децентралізованої системи транзакцій.

Згідно з дослідженнями провідної світової консалтингової компанії Accenture [8], тільки в країнах західної Європи за рахунок впровадження Блокчейн банки можуть економити 8 мільярдів із загальної суми витрат у 30 мільярдів доларів в рік. Використання технології однорангового Блокчейн забезпечуватиме високий рівень безпеки виконання транзакцій.

**Метою статті** є представлення рішення з проведення банківських транзакцій на основі технології

Блокчейн. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Розробити схему проведення транзакцій на основі Блокчейн
2. Визначити методи хешування для задачі шифрування.
3. Розробити програмне забезпечення безпечного проведення фінансових транзакцій.

### Методи реалізації

Блок — це одиниця Блокчейн, яка містить всі транзакції останнього сеансу або транзакції, обрані за заданим принципом. Після сеансу блок вбудовується в Блокчейн як елемент постійної бази даних.

Крім інформації про транзакції кожен блок містить посилання на попередній блок. Це посилання є розв'язком складної математичної задачі шифрування на основі необоротної криптографічної хеш-функції.

Для генерації цього посилання необхідно визначити випадкові числа, які в поєднанні з зашифрованим вмістом попереднього блоку генеруватимуть визначений результат. Комп'ютеру з 8 Гб оперативної пам'яті та 4-х ядерним процесором може знадобитись близько року на правильний підбір значень, але через велику кількість комп'ютерів в мережі, дана задача розв'язується в середньому в межах десяти хвилин.

Вміст кожного блоку представляється у зашифрованому вигляді як хеш. Хеш — це фрагмент даних фіксованої довжини, який можна асоціювати з відбитком пальця в кримінології. Хеші обчислюються за допомогою хеш-функцій. Перевага хешу полягає в тому, що якщо вхідні дані змінюються, вихідні дані також набудуть змін. Кожен блок в Блокчейн містить власний хеш, а також хеш попередника у своєму заголовку. Хеш повинен обчислюватися шляхом використання всієї інформації про блок. Метою його використання є захист цілісності даних блоку. Хеші широко використовуються в Блокчейн для представлення контрактів, маркерів, адрес гаманців. Навіть ідентифікатори транзакцій виражаються в хешах.

Хеші, які пов'язують кожен блок з його попередником, утворюють ланцюг до блоку генезису (першого блоку). Блок генезису є закодованим блоком, який не має посилання на попередній блок.

Технологія Блокчейн швидко розповсюджується в цифровому світі завдяки концепції, при якій кожна онлайн-транзакція, що виконана в минулому або ще виконується, може бути перевірена в будь-який час в майбутньому. Крім цього виконання транзакцій відбувається без завдання збитків конфіденційності цифрових активів залучених сторін. Важливими перевагами технології Блокчейн є анонімність та розподілений консенсус (Distributed Consensus). Для реалізації останнього у розподіленій базі даних задіяно відповідний механізм консенсусу.

Механізм консенсусу - це метод узгодження вузлами комп'ютерної мережі значення запропонованої транзакції або частини її даних, які в майбутньому будуть додані до Блокчейн у якості нових блоків.

Існує два основних методи досягнення консенсусу: PoS (Proof-of-stake) та PoW (Proof-of-work) [9]. В обох методах використовується поняття блоку.

Метод PoW запропоновано на початку 1990-х років [10]. Схема методу PoW містить такі етапи:

1. Створення блоку.
2. Розв'язання задачі генерації посилання блоку. Перевірка законності транзакції здійснюється всередині кожного блоку. Найперше вирішення задачі отримує винагорода. Таким чином стимулюється виконання складних перевірок. Винагорода виплачується як комісія з транзакції.

3. «Вбудова» поточного блоку в Блокчейн.

Після перевірки транзакції «вбудовуються» в загальнодоступний Блокчейн. Цей процес називають майнінгом (mining). Особливостями методу PoW є:

1. Необхідність виконання задачі, яка потребує багато обчислювальних ресурсів;
2. Можливість легкої та швидкої перевірки отриманого результату.

Метод PoS [11], представлений в 2012 році, є модифікацією PoW. На відміну від Блокчейн-систем на основі PoW методів, Блокчейн PoS не визначають автора блоків, виходячи виключно з наявної обчислювальної потужності та можливостей споживання енергії. Цей метод використовує випадково обрані валідатори (майнери) для перевірки блоків транзакцій. Крім цього, вимагається надання певної кількості криптовалюти в якості застави, що називається стейкінгом (staking). Оскільки в методі PoS автори блоків невідомі, його небезпечно використовувати для реалізації банківських транзакцій. Тому для розробки запропонованої системи було обрано метод PoW для виконання операцій над хеш-функціями. Для досягнення розподіленого консенсусу обрано хеш-функцію SHA256.

### Реалізація банківських транзакцій

В загальному вигляді схема розрахунків та відповідні системи їх забезпечення представлено на рис. 1.

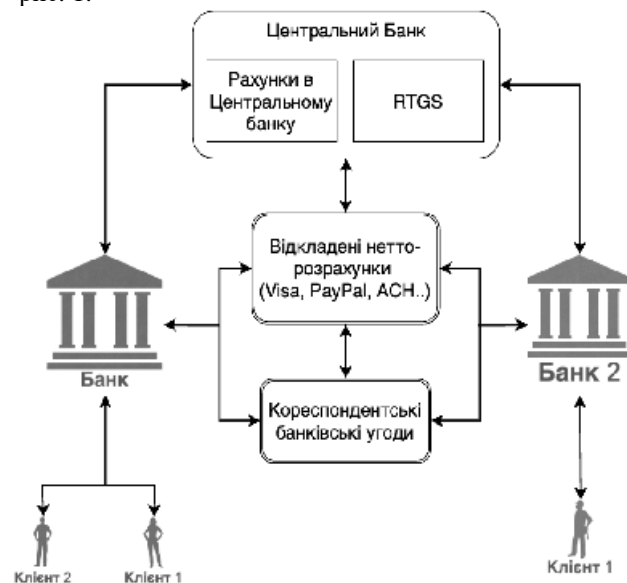


Рис. 1. Схема взаємодії клієнтів різних банків

Схема взаємодії клієнтів банків на рис. 1 відображає вищезазначені базові системи переказу коштів, окрім SWIFT.

Завдяки технології Блокчейн з'являється можливість здійснювати фінансові операції децентралізованим способом без залучення третіх сторін або центральних органів для цілей ведення обліку.

Відповідна схема представлена на рис. 2.

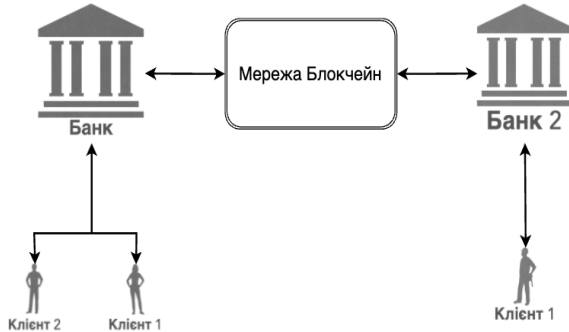


Рис. 2. Схема проведення транзакцій в системі на основі Блокчейн

Фактично всі системи, які забезпечують посередництво можна замінити мережею Блокчейн. Ця мережа складається з блоків представлення транзакцій. Таким чином розрахунки між банками проводяться без посередників та відкладення операцій та перевірок. Сеанс передачі коштів (виконання транзакцій) між двома клієнтами здійснюється за алгоритмом, представленим на рис. 3.

Програмна система забезпечує користувачу можливість створення транзакцій для переведення коштів в будь-якій валюті на гаманець іншого користувача, що дозволяє оминати весь процес переведення коштів через системи SWIFT, міжнародні банки, уникати величезних комісій та довгих очікувань проходження транзакції.

Таким чином технологія Блокчейн дозволяє подолати недоліки централізованої банківської системи, де користувачу доводиться залежати від третьої сторони для здійснення операцій.

Розроблена система має модульну реалізацію. Система містить такі основні модулі (рис. 4):

- Блокчейн;
- API (Бекенд частина);
- Мобільний застосунок.

В модулі Блокчейн вирішуються такі задачі:

1. Генерація та розсилка запиту на розв'язання задачі генерації посилання блоку.

2. Побудова блоку на основі отриманого хешу з розв'язком задачі.

3. Організація доступу для переведення коштів на основі запитів API модуля.

Перевірка гаманців відправника та отримувача коштів.

При успішному виконанні надісланих запитів дані транзакції генеруються і закодовуються в блок, в який додається посилання на попередній блок вузла блокчейну.

За допомогою мобільного застосунку користувач створює транзакцію:

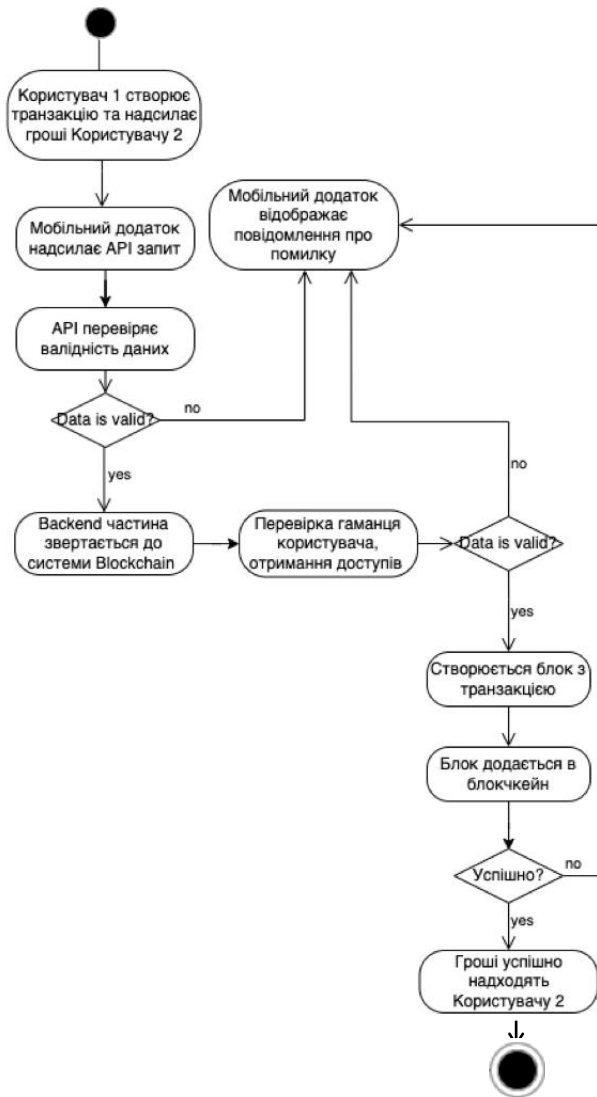


Рис. 3. Виконання транзакції з передачі коштів

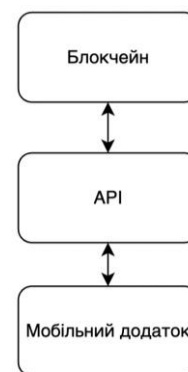


Рис. 4. Схема взаємозв'язків модулів системи

1. Вносить основні дані, такі як адреса гаманця отримувача, валюта переведення коштів, потрібна сума переведення.

2. Обирає гаманець, з якого будуть надіслані кошти.

Після заповнення даних транзакції мобільний застосунок надсилає запит на бекенд частину системи, де одразу перевіряється валідність введених даних та вживаються відповідні заходи. У випадку



невалідних даних - у відповідь в додаток користувачу надходить код та повідомлення помилки. У випадку успішної валідації вхідних даних - бекенд звертається до модуля Блокчейн.

В API реалізовано програмне забезпечення зв'язку з вузлами комп'ютерної мережі. Для цього використано Websockets API та HTTP-запити.

Запропонована система надає користувачам графічний інтерфейс для проведення транзакцій та функціонал обміну даними, представленими у вигляді ланцюжку блоків. Також система забезпечує майнінг і обмін валюти. Таким чином, користувачам забезпечується можливість безпечного здійснення будь-яких грошових операцій. Така методологія передбачає значне скорочення витрат коштів на комісії та надає можливість уникнути вразливостей, пов'язаних з безпекою.

Міцність безпеки Блокчейн постійно збільшується в геометричній прогресії і все більше блоків видобувається та зберігається в мережі, що робить практично неможливим змінення транзакції.

Запропонована система проведення банківських транзакцій має такі переваги:

1. Підвищується рівень безпеки проведення транзакцій.
2. Пришвидшуються розрахункові операції.
3. Значно зменшуються комісійні витрати.

### Висновки

1. Запропоновано схему проведення транзакцій з розрахункових операцій без банків-посередників.

2. На основі проведеного аналізу існуючих методів досягнення консенсусу обґрунтовано використання методу PoW та використання алгоритму хешування SHA256.

3. Розроблено програмну реалізацію проведення фінансових транзакцій. На основі технології Блокчейн, яка дозволяє проводити більш безпечні, швидкі та дешеві операції переведення коштів.

Перспективним напрямком подальших досліджень є розширення можливих операцій з надання банківських послуг на основі технології Блокчейн.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. BACS About Technical Resources [Electronic resource] // Schneider Electric – Access mode: <https://www.bacs.co.uk/About/Pages/About.aspx>.
2. A brief introduction to RTGS and CHAPS // 2021 – С. 122-138.
3. Івасів Б.С. Міжнародні розрахунки та валютні операції / Б.С. Івасів, Л.М. Прийдун, В.Я. Рудан // Навчальний посібник, 2013, № 1. – С. 40–53
4. Міжнародна система S.W.I.F.T. [Electronic resource] // Schneider Electric – Access mode: <https://www.bacs.co.uk/About/Pages/About.aspx>.
5. Greater visibility and transparency over your international payments [Електронний ресурс] // Schneider Electric – Режим доступу до ресурсу: <https://www.moneymover.com/about/faqs/what-mt103/>.
6. Crosby M. Blockchain Technology / Michael Crosby, Nachiappan, Pradhan Pattanayak, Sanjeev Verma, Vignesh Kalyanaraman. // Berkeley Education, Sutardja Center for Entrepreneurship & Technology Technical.
7. Dr. Lata Raha. Blockchain Technology in Financial and Banking Sector / Dr. Lata Raha, Ameya Dixit, Blaze Rodrigues, Kaustubh Yadav, Thomas Chacko // International Journal of Trend in Research and Development. – 2018. – №1. – P. 41–44.
8. Banking on blockchain. A value analysis for investment banks [Electronic resource] / Schneider Electric – Access mode: [https://www.accenture.com/t20170120t074124z\\_\\_w\\_/us-en/\\_acnmedia/accenture/conversion-assets/dotcom/documents/global/pdf/consulting/accenture-banking-on-blockchain.pdf](https://www.accenture.com/t20170120t074124z__w_/us-en/_acnmedia/accenture/conversion-assets/dotcom/documents/global/pdf/consulting/accenture-banking-on-blockchain.pdf).
9. Fukumits M. A Proposal of a Secure P2P-type Storage Scheme by using the Secret Sharing and the Blockchain / Masayuki Fukumits, Shingo Hasegawa, Jun-yaIwazaki, Masao Sakai, Daiki Takahashi. // IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2017.
10. Dwork C. Pricing via Processing Or Combatting Junk Mail, Advances in Cryptology / Cynthia Dwork, Moni Naor. // CRYPTO 1992. Annual International Cryptography Conference, 1992.
11. What Is Proof of Stake (PoS) in Crypto? [Electronic resource] // Schneider Electric – Access mode: <https://www.fool.com/investing/stock-market/market-sectors/financials/cryptocurrency-stocks/proof-of-stake/>.

Received (Надійшла) 18.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.03.2022

### Blockchain technology in banking

S. Shapovalova, O. Hulak

**Abstract.** The subject of research in the article is the implementation of banking transactions. The purpose of the work is to present a solution for conducting banking transactions based on Blockchain technology. The article presents the basic systems for transferring funds between banks, provides a simplified scheme for conducting a transaction, as well as a software system based on it. The following results were obtained: a solution for the software implementation of transactions between banks based on a client's request is presented. Conclusions: 1) a scheme for conducting transactions on settlement operations without intermediary banks is proposed; 2) based on the analysis of existing methods for reaching consensus, the use of the PoW method and the use of the SHA256 hashing algorithm are justified; 3) a software implementation of financial transactions based on Blockchain technology has been developed, which allows for safer, faster and cheaper fund transfer operations. A promising direction for further research is the expansion of possible operations for the provision of banking services based on Blockchain technology.

**Keywords:** Blockchain, distributed consensus, Proof-of-Stake, Proof-of-Work, banking transaction.

А. С. Янко, А. М. Мартиненко, В. В. Трикоз

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

## МЕРЕЖНІ СЕНСОРИ ТА ДЕТЕКТОРИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ ДАНИХ

**Анотація.** Дана стаття присвячена збору даних та аналізу мережі з метою розуміння принципів їх використання та запобігання хакерських зловмисних дій. Особлива увага приділяється аналізу – процес збору даних про безпеку та вжиття рішучих заходів на їх основі. В даній статті було сконцентровано увагу на механізмах виявлення вторгнень за рахунок використання мережних сенсорів та детекторів. У результаті були сформовані рекомендації щодо забезпечення ефективної інформаційної безпеки сучасної комп'ютерної мережі на основі застосування мережних сенсорів та детекторів. Також розглядалися заходи інформаційної безпеки для запобігання подальшим зловмисним діям.

**Ключові слова:** інформаційна безпека, комп'ютерна мережа, мережний детектор, мережний сенсор, політика безпеки, система виявлень вторгнень, сканування даних.

### Вступ

Ефективний аналіз безпеки вимагає збору даних з безлічі різних джерел, кожен із яких лише частково відбиває стан справ у мережі. Найскладніше завдання у проведенні аналізу з урахуванням даних – це збір достатньої кількості даних відтворення рідкісних подій. Достатнього, але не надлишкового, інакше буде неможливо виконати пошуковий запит. Збір даних напрочуд простий, але осмислення отриманих даних набагато складніше. У безпеці ця проблема ускладнюється рідкісним виникненням реальних загроз. Більшість мережного трафіку не несе жодної загрози і часто повторюється: масове розсилання листів або одночасний перегляд відео на YouTube великою кількістю користувачів, доступ до файлів. Багато з невеликої кількості фактичних атак будуть дійсно невинними, наприклад сліпе сканування порожніх IP-адрес

Ефективний моніторинг інформації будується на даних, зібраних з численних сенсорів, які генерують різні види даних та створюються різними людьми для різних цілей. Сенсором може бути все, що завгодно, від мережного відведення до журналу файрвола – тим, що здійснює збір інформації про вашу мережу та може бути використане для оцінки інформаційної безпеки. Побудова ефективної системи сенсорів вимагає досягнення балансу між її укомплектованістю та надмірністю. Ідеальна система сенсорів укомплектована, але не надмірна. Під укомплектованістю розуміється те, що кожна подія ретельно описана, а під відсутністю надмірності – те, що сенсори не дублюють інформацію про події. Ці, можливо, недосяжні цілі є ідеальною моделлю для побудови рішення щодо моніторингу [1, 2].

Процес аналізу даних, описаний у цій роботі, спрямовано розвиток знань у сфері безпеки з метою прийняття ефективних рішень у цій сфері. Це можуть бути експертні рішення: реконструкція подій постфактум з метою визначити, чому відбулася атака і що сприяло її здійсненню, або оцінити завдану шкоду. Також можна вдатися до профілактичних заходів: встановлення обмежувачів швидкості пере-

дачі, встановлення систем виявлення вторгнень або розробка стратегій, які можуть обмежити вплив хакера на мережу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Першим поштовхом для розвитку мережних сенсорів став розвиток бездротових сенсорних мереж. Наприклад, у 1970-1980 роках у американських військово-технічних системах розпочали використовувати прототипи сучасних мережних сенсорів у системі SOSUS – SOund SUrveillance System. Ця глобальна система звукового спостереження призначається для виявлення та ідентифікації радянських підводних човнів і передачі стану спостережень в центр обробки інформації по радіоканалам. Своєрідним рубежем в історії створення бездротових сенсорних мереж та мережних сенсорів та детекторів став 2003 рік, коли була опублікована перша версія стандарту IEEE 802.15.4 [3-5].

У даний час проблема інформаційної безпеки мереж є досить важливою та актуальною, це питання обговорюється на різноманітних конференціях та самітах, друкуються різні цікаві матеріали в даній області. Michael Collins у своїй книзі під назвою «Network Security Through Data Analysis: From Data to Action» значну увагу звернув на введення в загальний процес розпізнавання даних мережними сенсорами, а також ввів терміни для опису взаємодії сенсорів між собою. Наведені сучасні сенсори, такі як *tcpdump* та NetFlow, які здійснюють збір даних із мережних інтерфейсів. Значну увагу присвячено хост-сенсорам і сервісним сенсорам, які здійснюють збір даних про різні процеси, що відбуваються, наприклад, в серверах та операційних системах.

**Метою статті** є підвищення інформаційної безпеки комп'ютерних мереж підприємств на основі мережних сенсорів та детекторів, а також розгляду процесу розпізнавання даних мережними сенсорами та їх збору, як ефективного інструменту системи виявлень вторгнень.

### Виклад основного матеріалу

Мережний детектор збирає дані безпосередньо з мережного трафіку без допомоги посередницького

додатка, що і відрізняє його від хост-сенсорів. Прикладом можна навести NetFlow сенсори на роутері та сенсори, які використовують для збору даних трафіку такі інструменти моніторингу, як *tcpdump*.

При роботі з мережним трафіком ми стикаємося з проблемою, аналогічною тій, що виникає при роботі з усіма даними журналів: фактичні події безпеки відбуваються рідко, тоді як робота з даними вимагає часу та місця для зберігання. Перевага надається, по можливості, даними журналів, оскільки вони достовірні (у даних журналу фіксуються події високого рівня) і компактні. Те саме явище в мережному трафіку довелося витягувати з безлічі пакетів, які часто дублюються, зашифровані або просто незчитувані. У той же час зломиснику не важко маніпулювати мережним трафіком і запускати в мережі нешкідливі на перший погляд, але досить шкідливі сесії. Подія, що відображається в 300-байтному журналі, може запросто являти собою мегабайти пакетних даних, з яких лише перші 10 пакетів мають аналітичну цінність [6, 7].

Жоден із сенсорів не може виконувати всі функції поодиноці. Мережні сенсори дійсно виконують багато роботи, але їх легко спантеличити в процесі управління потоками трафіку, вони неефективні щодо зашифрованого трафіку і можуть лише припустити наявність активності в хості. Хост-сенсори надають більш вичерпну та точну інформацію щодо

явлень, для опису яких вони мають достатній інструментарій. З метою ефективного комбінування сенсорів їх класифікують у трьох площинах:

*Область огляду (Vantage)*. Розташування сенсорів усередині мережі. Сенсори, розташовані у різних точках, бачитимуть різні сторони однієї події.

*Рівень (Domain)*. Інформація, що надається сенсором, незалежно від місцезнаходження (хост, сервер хоста чи мережу). Сенсори з однаковою областю огляду, але різного рівня доповнюють один одного в процесі надання даних про одну і ту саму подію. Інформацію про деякі події можна отримати лише на одному з рівнів. Наприклад, моніторинг хоста – це єдиний спосіб визначити, чи мав місце фізичний доступ до цього хоста.

*Дія сенсора (Action)*. Як сенсор ухвалює рішення про створення інформаційного звіту. Він може просто записувати дані, надавати інформацію про події або обробляти трафік, який надає дані. Сенсори різної дії можуть потенційно заважати роботі один одного [1].

Область огляду сенсора дає уявлення, які пакети сенсор зможе вивчати. Область огляду визначається взаємозалежністю між розташуванням сенсора та інфраструктурою маршрутизації мережі. Щоб зрозуміти, як процеси впливають на область огляду, погляньте на рис. 1. На цьому рисунку показані унікальні потенційні сенсори, позначені великими літерами.

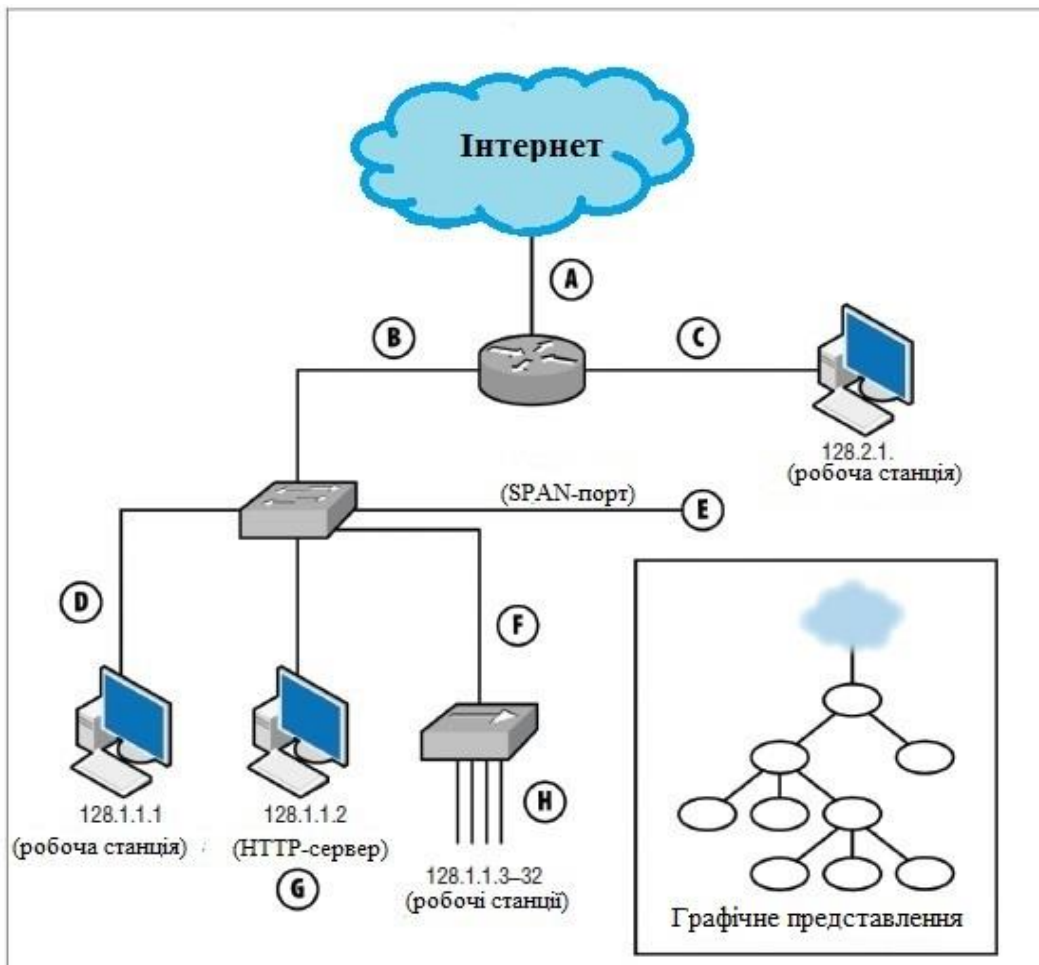


Рис. 1. Позиціонування сенсорів у простій мережі та графічне подання

У порядку черговості ці сенсори мають таке розташування:

*A* – перевіряє інтерфейс, що з'єднує роутер із Інтернетом;

*B* – перевіряє інтерфейс, що з'єднує роутер із мережним комутатором;

*C* – перевіряє інтерфейс, що з'єднує роутер і хост з IP-адресою 128.2.1.1;

*D* – перевіряє хост із адресою 128.1.1.1;

*E* – перевіряє SPAN-порт мережного комутатора (цей порт записує весь трафік, що проходить через комутатор);

*F* – перевіряє інтерфейс, що з'єднує мережний комутатор та мережний концентратор (хаб);

*G* – здійснює збір даних журналу НТТР у хості з адресою 128.1.1.2;

*H* – аналізує весь трафік протоколу TCP у мережному концентраторі.

Кожен із цих сенсорів має різну область огляду, тому бачитиме різні ділянки трафіку. Ви можете приблизно розрахувати область огляду сенсорів всередині мережі за допомогою простого графа, що складається з вершин і ребер, як показано в нижньому правому куті рис.1, а потім простежити, які з ребер перетинаються між вершинами. Сенсор, позначений рубом, реєструватиме весь трафік, що перетинає це ребро на шляху до точки призначення. Наприклад, згідно з рис.1:

- сенсор у точці *A* бачитиме лише трафік між мережею та Інтернетом, але не бачитиме, наприклад, трафік між адресами 128.1.1.1 та 128.2.1.1;

- сенсор у точці *B* бачить весь трафік між однією з адрес, розташованих нижче за нього на схемі, та адресою 128.2.1.1 або Інтернетом;

- сенсор *C* бачить тільки вихідний та вхідний трафік 128.2.1.1;

- сенсор *D*, як і *C*, бачить лише трафік, що виходить від адреси 128.1.1.1 або передається їм;

- сенсор *E* бачить весь трафік, що циркулює між портами комутатора: трафік від адреси 128.1.1.1 кудись ще, трафік від адреси 128.1.1.2 кудись ще, а також трафік з 128.1.1.3 в 128.1.1.32, що взаємодіє з

чимось ще за межами даного концентратора;

- сенсор *F* бачить частину трафіку, видимого сенсором *E*, а саме ту його частину, яка передається від 128.1.1.3 до 128.1.1.32, що взаємодіє з чимось ще за межами даного концентратора;

- сенсор *G* – особливий випадок, оскільки є журналом НТТР. Він бачить лише трафік протоколу НТТР (порти 80 та 443), де 128.1.1.2 – це адреса сервера;

- і нарешті, сенсор *H* бачить будь-який трафік, що відправляється або одержується будь-якою з адрес діапазону 128.1.1.3–128.1.1.32, а також трафік між цими хостами [1].

Жоден із сенсорів не охоплює всю мережу повністю. Крім того, у процесі роботи доведеться зіткнутися з надлишковим трафіком. Наприклад, якщо використовувати сенсори *H* і *E*, то побачимо трафік від 128.1.1.3 до 128.1.1.1 двічі. При виборі місця встановлення сенсора необхідно прагнути охопити мережу повністю, не блукаючи у надлишкових даних.

Оснащуючи мережу, необхідно визначати правильні місця встановлення сенсорів у три етапи: створення карти мережі, визначення потенційних точок встановлення сенсорів та визначення оптимального охоплення мережі.

*Перший етап* передбачає розробку карти мережі, розуміння того, як її елементи з'єднані один з одним, а також визначення потенційних точок встановлення сенсорів. Рис.1 є спрощеною схемою такої мережі.

*На другому етапі*, при оцінці області огляду, необхідно знайти потенційно прийнятні точки установки сенсорів мережі та визначити область, видиму з цих точок. Це значення може бути виражене у вигляді переліку комбінацій IP-адреси/порту.

Таблиця 1 показує приклад звіту для рис. 1. Побудови графа достатньо, щоб припустити, яке охоплення мережі забезпечуватиметься з точок встановлення сенсорів, але побудова більш точної моделі потребує більше інформації про маршрутизатори та мережне обладнання [8].

Таблиця 1 – Область видимості з точок встановлення сенсорів на рис. 1

Точка встановлення	IP-адреса джерела	IP-адреса пункту призначення
<i>A</i>	Інтернет	128.1, 2.1.1-32
	128.1, 2.1.1-32	Інтернет
<i>B</i>	128.1.1.1-32	128.2.1.1, Інтернет
	128.2.1.1, Інтернет	128.1.1.1-32
<i>C</i>	128.2.1.1	128.1.1.1-32, Інтернет
	128.1.1.1-32, Інтернет	128.2.1.1
<i>D</i>	128.1.1.1	128.1.1.2-32, 128.2.1.1, Інтернет
	128.1.1.2-32, 128.2.1.1, Інтернет	128.1.1.1
<i>E</i>	128.1.1.1	128.1.1.2-32, 128.2.1.1, Інтернет
	128.1.1.2	128.1.1.1, 128.1.1.3-32, 128.2.1.1, Інтернет
<i>F</i>	128.1.1.3-32	128.1.1.1-2, 128.2.1.1, Інтернет
	128.1.1.1-32, 128.2.1.1, Інтернет	128.1.1.3-32
<i>G</i>	128.1, 2.1.1-32, Інтернет	128.1.1.2:tcp/80
	128.1.1.2:tcp/80	128.1.2.1.1-32
<i>H</i>	128.1.1.3-32	128.1.1.1-32, 128.2.1.1, Інтернет
	128.1.1.1-32, 128.2.1.1, Інтернет	128.1.1.3-32

Наприклад, при роботі з роутерами ми можемо виявити, що огляд з точки установки сенсора асиметричний (зверніть увагу, що трафік, показаний на рис. 1, завжди симетричний).

*Третій етап* передбачає вибір оптимальних точок установки, показаних у цій таблиці. Мета – вибрати точки, які забезпечують моніторинг мережі за найменшою надмірністю трафіку. Наприклад, сенсор *E*, крім інших, бачить усі дані сенсора *F*, тому немає сенсу вибирати обидві точки. При виборі точок установки практично завжди доводиться мати справу з надмірністю трафіку.

У цій ситуації допоможе застосування правил фільтрації. Наприклад, щоб обробити трафік між хостами 128.1.1.3–32, у точці *H* необхідно встановити сенсор, і цей трафік спливатиме знову і знову в точках *E*, *F*, *B* та *A*. Якщо налаштувати сенсори в цих точках таким чином, щоб вони не були звітували про трафік, що надходить з адрес 128.1.1.3–32, проблема дублювання стає неактуальною.

Сенсор *G* дуже відрізняється від інших сенсорів, показаних на рис. 1.

Поки інші сенсори фіксують весь трафік мережі, *G* фіксує лише трафік протоколу HTTP (tcp/80).

Поки інші сенсори здійснюють збір даних трафіку в межах мережі, *G* збирає дані з іншого рівня. Рівень сенсора дає уявлення про інформацію, що він збирає.

## Висновки

Сенсори збирають інформацію про мережний трафік. Приклади таких сенсорів включають VPN, більшість систем виявлення вторгнень (IDSes), програми збору даних протоколу NetFlow, такі як YAF (Yet Another Flowmeter є еталонною реалізацією для стандарту IETF IPFIX і стандартним програмним забезпеченням захоплення пакетів потоку для інструментарію SiLK, YAF може читати *pcap* дані з файлів або отримати пакети безпосередньо, які він потім збирає в запису потоку і експортує на диск), а також програми збору даних протоколу TCP, такі як Snort, і сирі дані *tcpdump*. Мережу сенсори дають більше інформації, ніж хост-сенсори, не тільки тому, що вони бачать безліч хостів, але і тому, що хост може не реагувати на трафік, що відправляється по всій мережі. У той самий час якщо брати до уваги обсяг мережних даних, їх цінність невелика: доводиться аналізувати більшу кількість записів для розуміння події, і часто складно визначити, чи хост відреагував на мережний трафік. Мережні сенсори можуть допомогти в розслідуванні та лужити підмогою для хост-сенсорів, коли ця інформація недоступна [9]. Використання мережних сенсорів та детекторів є ефективним інструментом систем виявлення вторгнень (IDSes) для впровадження дієвої політики безпеки сучасних комп'ютерних мереж.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Michael Collins. Network Security Through Data Analysis: From Data to Action 2nd Edition, 2017. – 428 p.
2. Зиков І. С., Кучук Н. Г., Шматков С. І. Синтез архітектури комп'ютерної системи управління транзакціями e-learning. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 3. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>.
3. Катренко А. Особливості інформаційної безпеки за міжнародними стандартами // Альманах економічної безпеки. – 1999. – №2. – С. 15–17.
4. Кучук Н.Г., Гавриленко С.Ю., Лукова-Чуйко Н.В., Собчук В.В. Перерозподіл інформаційних потоків у гіперконвергентній системі / С.Ю. Гавриленко. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 2. С. 116-121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.20>.
5. Nechausov A., Mamusić I., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 21 – 26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.
6. Bonabeau Eric. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems / Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Therauaz. – NY: Oxford University Press Inc. – 1999. – 306 p.
7. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
8. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines / S. Haykin. - Prentice Hall. – 2009. – 906 p.
9. Кузьменко Б.В., Чайковська О.О. «Захист інформації. Частина 2. Програмно-технічні засоби забезпечення інформаційної безпеки». – 2009.

Received (Надійшла) 21.10.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 05.01.2022

## Network sensors and detectors as an effective data monitoring tool

A. Yanko, A. Martynenko, V. Trykoz

**Abstract.** This article is devoted to data collection and network analysis in order to understand the principles of their use and prevent hacker malware. The main considerations for security measures are considered. An in-depth understanding of the areas of information security is provided. For each attack scenario, the most effective scenarios for protection and formation of an effective information security policy were selected and developed. Developing the right structure requires an understanding of how different sensors collect data, how they complement, duplicate, and interact with each other, and an understanding of the principles of efficient data storage to enable analysis. It is these problems that are emphasized in this paper. Particular attention is paid to analysis - the process of collecting safety data and taking decisive action based on them. This article focuses on the mechanisms of intrusion detection through the use of network sensors and detectors. As a result, recommendations were made to ensure effective information security of a modern computer network based on the use of network sensors and detectors. Information security measures to prevent further malicious actions were also considered.

**Keywords:** information security, computer network, network detector, network sensor, security policy, intrusion detection system, data scanning.

О. А. Янковський<sup>1</sup>, Д. О. Янковська<sup>1</sup>, Г. В. Полікарпова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний медичний університет, Харків, Україна

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМІЧНИХ ОПІКІВ ШКІРИ У ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТВАРИН

**Анотація.** У статті розглянута автоматична система для моделювання термічних опіків шкіри у експериментальних тварин. Запропонована система складається з нагрівального елемента з підключеним до нього датчиком температури, комп'ютеру (або ноутбук), до якого через інтерфейс USB підключається зовнішній виконавчий пристрій, реалізований на мікроконтролері, який регулює температуру нагрівального елемента за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Програмне забезпечення дозволяє задавати необхідні параметри термічного впливу (температуру, час, кратність) та передбачає можливість його розширення використанням автоматичного підбору температури та часу впливу в залежності від виду експериментальної тварини, ділянки тіла, що підлягає впливу та бажаного ступеня опіку. Наявність комп'ютера дає змогу вносити та зберігати дані щодо умов експерименту, тварин та результати досліджень з автоматичним формування карток експериментальних тварин та можливістю переносити дані до інших програм, наприклад для статистичної обробки результатів. Система може бути застосована для досліджень в області біології та медицини, зокрема у доклінічних випробуваннях препаратів.

**Ключові слова:** опік, система, моделювання, ушкодження, експериментальна тварина, мікроконтролер.

### Вступ

Опік - це травма шкіри або інших органічних тканин, що спричиняється переважно високими температурами, а також випромінюванням, радіоактивністю, електрокою, тертям або контактом з хімічними речовинами. Даний вид травм є глобальною проблемою в галузі охорони здоров'я – за оцінками ВООЗ, у світі щорічно трапляється 180 000 випадків смерті від опіків. Опікова травма характеризується важким перебігом, високою частотою розвитку ускладнень та великим ризиком подальшої інвалідації пацієнта. Статистичні дані свідчать про те, що саме термічний вид опіку є найбільш широко розповсюдженим [1]. У зв'язку з зазначеним вище розробка нових методів експериментального моделювання термічних опікових ушкоджень шкіри піддослідних тварин з метою подальшого вивчення особливостей репарації тканин та впровадження ефективних способів терапії є дуже актуальною проблемою.

Експериментальні дослідження динаміки розвитку опіків, процесу загоєння рани, доклінічні випробування ефективності нових лікарських засобів не можуть бути проведені на клітинних культурах, адже опікове ушкодження викликає метаболічні та імунологічні зміни у цілому організмі. Крім того, небезпечним ускладненням глибоких опіків або опіків великої площі є опікова хвороба, що розвивається внаслідок руйнування тканин та викликає значну летальність, що обумовлена порушенням центральної гемодинаміки і мікроциркуляторних розладів внаслідок первинної гіповолемії, стрес-реакції, масового вивільнення цитокінів.

А це, в свою чергу, призводить до зменшення газотранспортної функції крові, падіння онкотичного тиску, метаболічному ацидозу – основних факторів розвитку поліорганної недостатності і виникнення раннього сепсису [2]. Терапія опікової хвороби являє собою гостру медичну проблему та потребує експериментальних досліджень.

Серед наявних методів експериментального моделювання термічних опіків існує спосіб, що вимагає занурення спини тварини у воду, нагріту до температури 96°C протягом певного часу за допомогою пристрою, який складається з коліски з отвором та водяної бані [3]. Проте, даний метод не дає змоги змінювати площу та локалізацію опіку та викликає «вологий» некроз, що характеризується більш важким перебігом. Інший метод включає виклик опіку шкіри контактним способом за допомогою пробірки або спеціального пристрою з нагрітою до 100°C водою [4, 5]. Існують методи, що передбачають моделювання термічного опіка за допомогою повітря, нагрітого до 500°C, що генерується електрофеном [6] та з використанням світловода лазера [7] або за допомогою інфрачервоної лазерної станції [8]. Всі ці методи дозволяють викликати термічні опіки різного ступеня за допомогою зміни часу впливу термічного агента. Недоліками способів, описаних вище, є неможливість змінювати площу опікового ушкодження та недостатньо способів регуляції режиму температурного впливу на експериментальну тварину, а також відсутність можливості автоматичного контролю заданих параметрів. Це унеможливує, наприклад, моделювання опіків різної площі в рамках одного експерименту. Крім того, методи моделювання термічних опіків, що передбачають безконтактний температурний вплив на експериментальну тварину, зокрема за допомогою нагрітого повітря або інфрачервоної лазерної станції, не дають змогу задати потрібну площу рани в см<sup>2</sup>, а лише дозволяють отримати опікове ушкодження, що вимірюється у відносних величинах – відсотках від загальної площі шкіри, - та потребують додаткові розрахунки загальної площі поверхні шкіри за вагою піддослідної тварини.

Завдання експериментів – як візуальна оцінка динаміки розвитку опікового процесу з використанням індексів загоєння рани, так і дослідження ряду показників що дають змогу зробити висновки щодо

розвитку ендогенної інтоксикації, динаміки прозапальних та протизапальних процесів, як у крові, так і в ураженій ділянці шкіри експериментальних тварин при термічних опіках. Дослідження вищезазначених параметрів дають змогу зробити висновки щодо ефективності нових лікарських засобів, що використовуються для терапії опіків різної площі та ступеню. Також актуальним є виділення значущих біохімічних, імунологічних, гормональних показників при термічних опіках шкіри для оцінки тяжкості опікового процесу, ризику розвитку опікової хвороби, прогнозу можливості самостійної репарації в уражених ділянках, ризику виникнення можливих ускладнень.

**Мета статті** – опис автоматизованої системи для моделювання термічного опіка шкіри у експериментальних тварин контактним способом, яка була розроблена в рамках договору про співробітництво між кафедрою біологічної хімії Харківського національного медичного університету та кафедрою ЕОМ Харківського національного університету радіоелектроніки, та деякі результати її застосування.

### Практичні результати

Для моделювання термічного опіка шкіри експериментальних тварин контактним способом запропонована комп'ютерна система регулювання температури. Дана система призначена для регулювання температури нагрівального елемента для проведення медико-біологічних досліджень щодо реакції тварин на теплові подразники.

Структура системи показана на рис. 1.

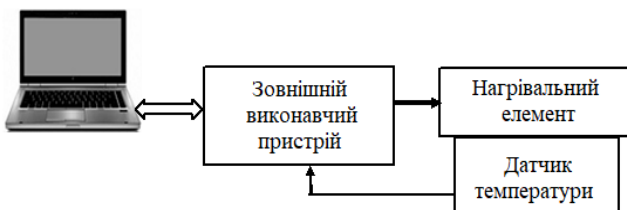


Рис. 1. Структура системи регулювання температури

До складу системи входять нагрівальний елемент з підключеним до нього датчиком температури, комп'ютер (або ноутбук), до якого через інтерфейс USB підключається зовнішній виконавчий пристрій, реалізований на мікроконтролері, який регулює температуру нагрівального елемента за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Як нагрівальний елемент використовуються латунні патронні нагрівачі діаметром від 3 до 50 мм (площа контакту від 7 до 1900 мм<sup>2</sup>) потужністю 50 Вт/см<sup>2</sup>, закріплені на термоізоляційному утримувачі.

Працює система в такий спосіб.

За допомогою програмного забезпечення даної системи перед початком вимірювань формується інформація про об'єкт дослідження (вид тварини, стать, вік, порядковий номер), а також дату, час дослідження. Також вказується необхідна температура нагрівального елемента (в діапазоні від 10°C до 500°C з кроком в 1°C), час дії (від 0,5 до 60 секунд з дискретністю 0,5 с), режим впливу - одиночний або багаторазовий.

По команді «СТАРТ» включається нагрівальний елемент, інформація від датчика температури через зовнішній виконавчий пристрій надходить у комп'ютер, і коли температура нагрівального елемента стабілізується на заданому значенні, на екрані монітора з'являється команда про дозвіл впливу нагрівальних елементів на об'єкт. Дослідник після дотику до об'єкта дослідження, натискає кнопку на утримувачі нагрівального елемента, і комп'ютер починає відлік часу, зазначеного на початку експерименту, після закінчення якого лунає звуковий сигнал. Після завершення звукового сигналу в залежності від вибраного режиму роботи нагрівальний елемент або вимикається, або готується для наступного вимірювання.

Інформація щодо протоколів проведених експериментів по кожній тварині зберігається у базі даних, яка входить до програмного забезпечення системи, та дає можливість вносити туди результати вимірювань клінічних, імунологічних, біохімічних гістологічних та ін. показників та одиниці їх виміру з автоматичним формуванням картки експериментальної тварини.



Рис. 2. Термічний опік шкіри задньої поверхні стегна морської свинки площею 1 см<sup>2</sup> IIb ступеню

*Приклад експерименту.* Завдання: необхідно викликати термічний опік шкіри задньої поверхні стегна морської свинки площею 1 см<sup>2</sup> IIb ступеню. Для цього голимо відповідну ділянку шкіри. Тварину наркотизуємо за допомогою препарату «Пропофол» у дозі 2,5 мг/кг інтраперитонеально. Вибираємо патронний нагрівач відповідного діаметру. Вносимо в комп'ютер дату, час експерименту, вид тварини, вік, стать, вагу, порядковий номер, площу та ступінь опіку. З даних літератури відомо, що для спричинення опіку IIb ступеню шкіри морської свинки необхідна температура нагрівального елемента 230°C, час експозиції – 3 секунди [8]. На комп'ютері виставляємо температуру 230°C, час впливу – 3 секунди, режим – одиночний. Наркотизовану тварину фіксуємо та наносимо опік за допомогою нагрівального елемента контактним способом. Результати застосування системи представлені на рис. 2.

В результаті через добу після нанесення опіку у тварини відмічається сухий «коагуляційний» некроз ушкодженої ділянки шкіри діаметром 1 см<sup>2</sup> та ознаки запалення: біль, почервоніння, набряк. На другу

добу некротизовані тканини відторгаються та формується дефект прощою 1 см<sup>2</sup> та глибиною, що відповідає ІІв ступеню опіка. На третю добу відмічали-

ся виражені ознаки запального процесу, проте площа дефекту зменшилася на 6 – 10 %. Жодних препаратів для лікування дефекту не застосовували.

Дата: 19.12.2021						
Номер тварини Т-1						
Вид: Мурчак Вага: 590 г Вік: 4 міс. Стать: самець						
Умови експерименту: Т- 230°C, час експозиції – 3 секунди, режим – одиночний						
Дата евтаназії: 22.12.2021						
Цільна кров						
ШОЕ, мм/год	Лейкоцити, 10 <sup>9</sup> /л	Еозинофіли, %	ПАН, %	СЯН, %	Моноцити, %	Лімфоцити, %
6,83	9,51	3,2	6,67	18,4	3,24	63,77
Сироватка крові			Цільна кров			
СРБ, мг/л	Гаптоглобін, мг/л	Сіркомуюїди, мг/л	ЦІК с.р., у.о.	ЦІК в.р., у.о.	ФЧН	ФІН
9,8	1,25	0,56	0,122	0,092	1,68	42,53
Препарати ураженої ділянки шкіри			Сироватка крові			
Загальний Колаген, у.о.	Колаген, 1 тип, у.о.	Колаген, 3 тип, у.о.	Колаген, 5 тип, у.о.	Колаген, 6 тип, у.о.	АКТГ, пкг/л	Кортикостерон, нМ/л
3,07	2,07	0,74	0,09	0,23	7,16	7,93
Сироватка крові						
ІЛ-1β, пкг/мл	ІЛ-2, пкг/мл	TNF-α, пкг/мл	ІЛ-4, пкг/мл	ІЛ-10, пкг/мл		
15,82	16,39	5,35	18,63	1,03		
Гомогенат шкіри						
ІЛ-1β, пкг/г білка	ІЛ-2, пкг/г білка	TNF-α, пкг/г білка	ІЛ-4, пкг/г білка	ІЛ-10, пкг/г білка		
115,26	6,95	62,75	1,16	0,94		
Сироватка крові		Гемолізат				
ТБК-АП, мкМ/л	ДК, мкМ/л	Каталаза мкКатал/г Нь	СОД, мг/г Нь			
5,86	64,67	6,17	43,86			

Рис. 3. Автоматично сформована картка експериментальної тварини

Морську свинку декапітували на третю добу експерименту, дату евтаназії внесли до системи. Були проведені дослідження показників запалення шляхом визначення лейкоцитарної формули, швидкості осідання еритроцитів, фагоцитарної активності нейтрофілів за сумою фагоцитарного числа та фагоцитарної активності нейтрофілів у цільній крові, рівня сіркоуюїдів, гаптоглобіну, С-реактивного білка, цирку-

люючих імунних комплексів великих та середніх розмірів, кортикостерону, адренкортикотропного гормону в сироватці крові, прозапальних інтерлейкінів - 1β, 2, фактору некрозу пухлин-α, протизапальних інтерлейкінів 4, 10 у сироватці крові та гомогенатах ураженої ділянки шкіри. Для оцінки динаміки відношення прооксидантних та антиоксидантних процесів визначали концентрацію ТБК-активних продуктів та



дієвних кон'югатів у сироватці крові та гомогенатах ураженої ділянки шкіри, активностей каталази та супероксиддисмутази у гемолізатах крові та гомогенатах ураженої ділянки шкіри. Також було проведено гістологічне дослідження препаратів ураженої ділянки шкіри, вимірювання рівня загального колагену та визначення його першого, третього, п'ятого та шостого типів для оцінки тяжкості дефекту та динаміки репаративних процесів. Отримані результати, одиниці виміру та матеріал були внесені до бази даних, яка автоматично сформувала картку експериментальної тварини. Приклад такої картки представлений на рис. 3. У випадку, якщо експериментальній тварині проводилося лікування за допомогою протиопікових препаратів, в систему вноситься інформація щодо назви препарату дози, форми та кратності його застосування. Також до бази даних можуть бути внесені результати досліджень тварин контрольної групи, які не підлягали впливу жодних ушкоджуючих факторів та не отримували лікування жодними препаратами.

Картки піддослідних тварин та протоколи експерименту зберігаються у пам'яті комп'ютера. Це дозволяє, наприклад, скопіювати та завантажити дані у інші програми, зокрема, для статистичної обробки отриманих результатів. Таким чином, запропонована система може бути застосована не тільки

для моделювання опіків шкіри експериментальних тварин, але і для збереження та обробки даних, які будуть отримані в результаті експерименту.

### Висновки

Запропонована система дає змогу викликати термічні опіки будь-якої ділянки шкіри експериментальних тварин. Комп'ютерне управління дозволяє застосовувати автоматичну регуляцію температури та часу впливу, що необхідно для моделювання опіку необхідної глибини, а наявність нагрівальних елементів різного діаметру дозволяє наносити опікові рани різної площі. Програмне забезпечення можна розширити можливістю автоматичного підбору температури та часу впливу в залежності від виду експериментальної тварини, ділянки тіла, що підлягає впливу та бажаного ступеня опіку. Наявність комп'ютера дає змогу вносити та зберігати дані щодо умов експерименту, тварин та результати досліджень з автоматичним формування карток експериментальних тварин та можливістю переносити дані до інших програм, наприклад для статистичної обробки результатів.

Система може бути застосована для досліджень в області біології та медицини, зокрема у доклінічних випробуваннях препаратів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Информационный бюллетень ВОЗ №365, апрель 2014 г. [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs365/ru/>.
2. Коваленко О. Інфузійна терапія в гострому періоді опікової хвороби [Електронний ресурс] / О. Коваленко, Г. Козинець – Режим доступу до ресурсу: <https://www.uf.ua/ua/hirurg/infuzijna-terapiya-v-gostromu-periodi-opikovoji-hvoroby/>.
3. Davenport L. A new model for standardising and treating thermal injury in the rat / L. Davenport, G. Dobson, H. Letson. // *MethodsX*. – 2019. – №6. – P. 2021–2027.
4. Влияние препарата ионизированного серебра на репаративную регенерацию кожи и подлежащих тканей при моделировании термических и химических ожогов у крыс / Н. С. Пономарь, Ю. С. Макляков, Д. П. Хлопонин, А. О. Ревякин. // *Биомедицина*. – 2012. – №1. – С. 143–148.
5. Разработка устройства для воспроизведения термического ожога на лабораторных животных [Електронний ресурс] / [О. О. Новиков, Е. А. Абизов та ін.] // *Актуальные проблемы медицины*. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-ustroystva-dlya-vozproizvedeniya-termicheskogo-ozhoga-na-laboratornyh-zhivotnyh>.
6. Патент РФ 2210118. Способ моделирования ожоговой травмы в эксперименте у животных / Моновцов И. А., Лазаренко В. А., Блинков Ю. Ю., Лазарев Е. В.; 08.10.01.
7. Патент РФ 2472232. Способ моделирования термической ожоговой раны кожи у лабораторных животных / Колсанов А. В., Алипов В. В., Лебедев М. С., Добрейкин Е. А., Лимарева Л. В.; 24.03.11, Бюл. №1.
8. Пахомова А. Е. Новый способ экспериментального моделирования термических ожогов кожи у лабораторных животных, отвечающий принципам good laboratory practice (надлежащей лабораторной практики) / А. Е. Пахомова, Ю. В. Пахомова, Е. Е. Пахомова. // *Journal of Siberian Medical Sciences*. – 2015. – №3. – С. 97.
9. Парамонов Б. А. Методы моделирования ожогов кожи при разработке препаратов для местного лечения / Б. А. Парамонов, В. Ю. Чеботарев // *Бюлл. экспер. биол. и мед.* 2002. Т. 134. № 11. С. 593–597.

Received (Надійшла) 14.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.03.2022

### Automated system for thermal skin burns modeling in experimental animals

O. Yankovsky, D. Yankovska, H. Polikarpova

**Abstract.** The article considers an automatic system for modeling thermal skin burns in experimental animals. The proposed system consists of a heating element with a temperature sensor connected to it, a computer (or laptop) to which an external actuator implemented on a microcontroller is connected via USB, which regulates the temperature of the heating element by pulse-width modulation. The software allows you to set the required parameters of thermal exposure (temperature, time, multiplicity) and provides the ability to expand it using automatic selection of temperature and exposure time depending on the species of experimental animal, the affected area and the desired degree of burns. The availability of a computer allows to enter and store data on the conditions of the experiment, animals and research results with automatic generation of cards of experimental animals and the ability to transfer data to other programs, such as statistical processing of results. The system can be used for research in biology and medicine, in particular in preclinical trials of drugs.

**Keywords:** burn, system, modeling, damage, experimental animal, microcontroller.

Р. О. Ярошевич, А. А. Коваленко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## Аналіз технологій підвищення ефективності Тактильного Інтернету у комп'ютерних мережах

**Анотація.** Метою даної роботи є проведення аналізу технологій які зможуть забезпечити підвищення ефективності Тактильного Інтернету (ТІ) у комп'ютерних мережах. Концепція ТІ набула свого розвитку завдяки появі та розвитку технологій, що вимагають досить малої затримки при доставці даних. Це насамперед послуги з певними вимогами до інтерактивності. Зокрема, це можуть бути різноманітні системи управління, пов'язані з передачею тактильних відчуттів від виконавчих механізмів і сенсорів на органи управління. Для підвищення ефективності ТІ сьогодні розглядається низка перспективних технологій, наприклад, технологія взаємодії пристрій-пристрій, D2D (Device-to-Device), без використання базової станції, що дозволяє ефективно побудувати надщільні комп'ютерні мережі. Для побудови мереж з малими затримками великого значення набувають технології типу MEC (Mobile Edge Computing), програмно-конфігурованих мережах SDN (Software Defined Networks) та віртуалізації мережних функцій NFV (Network Functions Virtualization). Комп'ютерні мережі з низькими затримками, в основі яких лежить концепція Тактильного Інтернету, мають велике значення при виборі методу побудови комп'ютерних мереж. В даній статті розглянуто різні технології та проаналізовані основні переваги та проблеми означених технологій, які вимагають подальшого їх дослідження.

**Ключові слова:** Тактильний Інтернет, комп'ютерна мережа, віртуалізації мережних функцій, програмно-конфігуровані мережі.

### Вступ

Тактильний Інтернет, як частина глобальної мережі, повинна поєднувати у собі наднизьку затримку передачі даних водночас з високою доступністю, надійністю та безпекою. Так, ключовою особливістю, яка відрізняє Тактильний Інтернет, є підвищена доступність надійних високошвидкісних з'єднань через мобільний та широкосмуговий доступ до мережі із надзвичайно малим терміном очікування в обох напрямках [1]. Технологія Тактильного Інтернету є наступним щаблем розвитку Інтернету речей, що передбачає передачу не лише звукових та відео даних, а й еквівалент людських дотиків, рухів, дій. Наприклад, з його допомогою можна вчити малювати, грати на музичних інструментах, робити віддалені хірургічні операції, тобто все, що вимагає навичок «дрібної моторики».

Відповідно, реалізація такої ідеї вимагає побудови концепцій нових надщільних мереж, що забезпечують підключення набагато більшої кількості пристроїв та забезпечення низької затримки. Прикладом такої мережі може бути мережа 5G, що ще розробляється і тестується в даний час. Саме мережі зв'язку п'ятого покоління не тільки змінили погляд на розвиток комп'ютерних мереж в цілому, але й привели до появи цілого ряду нових напрямків в науково-дослідних роботах в галузі комп'ютерних систем та мереж [2].

Принцип Тактильного Інтернету можна розглядати як тришарову систему, засновану на структурі мережі 5G (рис. 1). У цій структурі розділені апаратне та програмне забезпечення, а для сумісності послуг на рівні програм використовуються інтерфейси прикладного програмування (API) [3].

Перший рівень – це рівень апаратних ресурсів, який включає інфраструктуру мережі із необхідними граничними хмарами, на другому рівні встановлюється програмне забезпечення, тут же розміщу-

ються бібліотеки для всіх функцій, необхідних у мережі. Ці бібліотеки є програмними функціями та модулями, які можна використовувати у необхідному місці мережі. Крім того, на цьому рівні розміщуються параметри радіодоступу та інші установки, необхідні для конфігурації мережі. І, нарешті, прикладний рівень, на якому визначено сервіси та програми, необхідні системним операторам мережі.

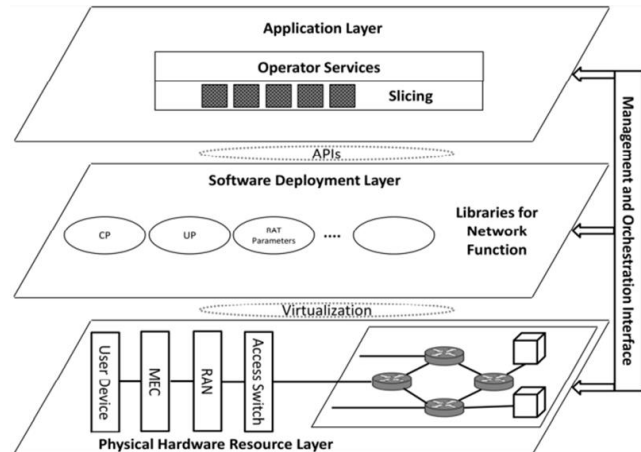


Рис. 1. Основні рівні системи Тактильного Інтернету

Три рівні системи пов'язані через інтерфейс управління системою та оркестрування. Цей інтерфейс відповідає за керування роботою перших двох рівнів. Інтерфейс керування та оркестрування підключений до першого рівня через API для виконання завдань, налаштування системи та моніторингу стану та продуктивності. Програмне забезпечення та параметри другого рівня також можуть бути обрані у будь-який час керуючим інтерфейсом через API. Взаємодія між прикладним рівнем та інтерфейсом управління та оркестрування дозволяє інтерфейсу вибирати відповідний мережний кластер для кожної програми або зіставляти його з існуючим кластером.

**Мета статті** – провести аналіз технологій забезпечення підвищення ефективності Тактильного Інтернету у комп'ютерних мережах, виявити основні переваги і проблеми даних технологій для подальшого їх дослідження та впровадження, а також вплив факторів на зниження ефективності ТІ.

**Аналіз сучасних технологій реалізації концепції Тактильного Інтернету**

Комп'ютерні мережі з низькими затримками, в основі яких лежить концепція Тактильного Інтернету, мають велике значення при виборі методу побудови комп'ютерних мереж. Реалізація концепції Тактильного Інтернету можлива тільки за умови впровадження нових технологій, наприклад:

- технології програмно-комутованих мереж SDN (Software Defined Networks);
- технології віртуалізації мережних функцій NFV (Network Functions Virtualization);
- мобільних граничних обчислень MEC (Mobile Edge Computing);
- технології MIMO (Multiple Input Multiple Output);
- технології взаємодії пристрій-пристрій D2D (Device-to-Device).

Використання технологій NFV та SDN дозволяє поділити мережу на віртуальні шари або сегменти і, таким чином, спрощує управління кожним із них та мережею в цілому. При цьому кожен сегмент відповідає за надання певної послуги та налаштований для її ефективної роботи. В результаті одна фізична мережа забезпечує надійне функціонування різних послуг з власними налаштуваннями, а оператор має можливість здійснювати окреме управління

кожним шаром або встановлювати однакові управлінські налаштування для декількох шарів одночасно. Це дозволить зменшити варіації затримок, що є однією з головних вимог до Тактильного Інтернету. Таким чином, спільне застосування технологій SDN та NFV забезпечить конвергенцію не лише на рівні сервісів, а й на рівні інфраструктури [5].

Технологія MEC полягає у перенесенні обчислень, пов'язаних з трафіком та сервісами, з централізованої хмари на границю мережі та ближче до клієнтів. Гранична область мережі аналізує, обробляє та зберігає дані замість того, щоб відправляти їх у хмару для обробки. Збір та обробка даних ближче до клієнтів знижує затримку та підвищує продуктивність у реальному часі для додатків з високою пропускнуною спроможністю. Зазвичай, MEC розгортаються за допомогою центрів обробки даних, що знаходяться на межі мережі. Для додатків на межі мереж потрібна висока пропускну здатність та низька затримка. Для цього постачальники послуг створюють розподілені центри обробки даних або розподілені хмари. Ресурси, що становлять хмару, можуть бути де завгодно: від централізованого центру обробки даних (ЦОД) до вузла стільникового зв'язку, центрального офісу, вузла агрегування, міського ЦОД або на території клієнта. Технологія MEC дозволяє виконувати розподілені граничні обчислення, опрацьовуючи контент на межі за допомогою сервера або хмарного абонентського обладнання. Більшість проектів із граничними обчисленнями розробляються за допомогою обладнання та програмних засобів з відкритим вихідним кодом, які використовують парадигми хмари та віртуалізації, включаючи SDN та NFV (рис. 2).

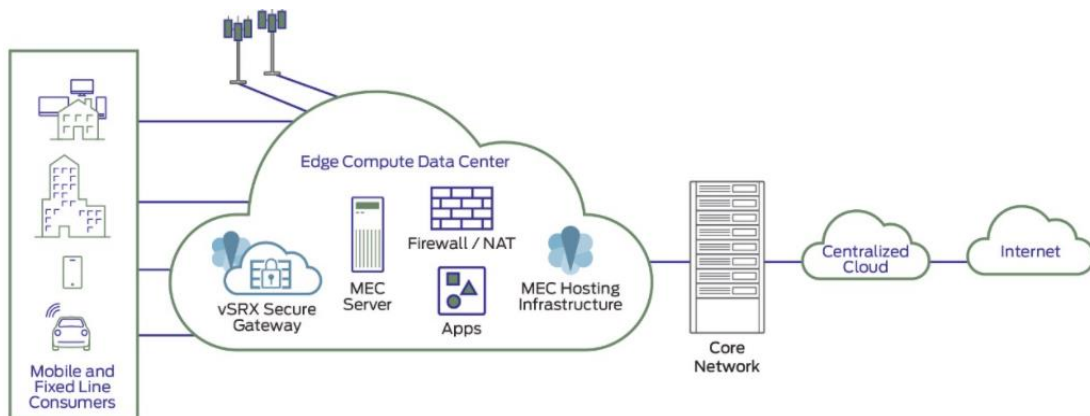


Рис. 2. Схема граничних обчислень з множинним доступом (MEC)

Технологія MIMO – це технологія просторового кодування сигналу, який дозволяє збільшити смугу пропускання каналу, при передачі та отриманні даних, за рахунок систем з декількома антенами (рис. 3). Приймальні та передавальні антени розміщують таким чином, щоб кореляція між сусідніми антенами була досить слабкою. Застосування технології MIMO вирішує питання підвищення швидкості передачі при просторовому мультиплексуванні та покращення якості зв'язку за рахунок просторово-тимчасового/частотного кодування або формування променів.

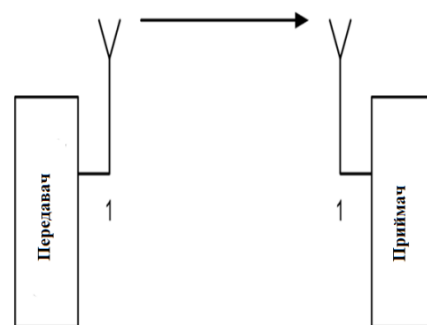


Рис. 3. Схема технології MIMO

Перебуваючи між передавачем та приймачем, сигнал може проходити багато шляхів. Крім того, переміщуючи антени навіть на невелику відстань, доріжки, що використовуються, будуть змінюватися, за рахунок кількості об'єктів, які з'являються збоку або навіть прямо на шляху між передавачем і приймачем і можуть бути використані для забезпечення додаткової надійності для радіолінії шляхом покращення відносин сигнал/шум або збільшення пропускної спроможності каналу зв'язку.

Технології взаємодії пристрій-пристрій D2D (Device-to-Device) дозволяють покращити ефективність використання радіоспектру, підвищити пропускну здатність і знизити споживання електроенергії користувальницькими терміналами [2]. Технології D2D дозволяють як розвантажити ядро мережі шляхом замикання значної частки трафіку безпосередньо між пристроями, так і зменшити час відгуку клієнта при наданні послуг мережі [2].

Технологія D2D у мережі Тактильного Інтернету передбачає можливість організації з'єднань наступних типів (рис. 4).

- термінал А – термінал R (або кілька терміналів) – БС (базова станція); пристрої взаємодіють із базовою станцією через ретрансляцію інформації за допомогою інших пристроїв;

- термінал А – БС – термінал В; пряма взаємодія без участі базової станції (взаємодія координується оператором);

- термінал А – термінал R (або кілька терміналів) – термінал В; пристрої передавача та одержувача відповідають за координацію взаємодії з використанням ретрансляторів; у цьому випадку пристрої передавача та споживача мають прямий зв'язок один з одним без будь-якого контролю з боку оператора;

- термінал А – термінал В; мають прямий зв'язок між собою без участі базової станції та без будь-якого контролю з боку оператора.

Основні переваги та проблеми даних технологій, які вимагають подальшого дослідження наведені в табл. 1.

Застосування D2D-технологій потенційно суттєво розширює можливості організації комп'ютерних мереж. Поряд з організацією прямих зв'язків з різними пристроями (моніторами, принтерами, телевізійними приймачами і т.д.), D2D взаємодії можуть бути використані для організації кластерів і транзиту трафіку через один з пристроїв, вибраний як головний (транзитний) вузол кластера. Застосування D2D-кластеризації підвищує ефективність використання радіочастотного ресурсу мережі.

Таблиця 1 – Результати аналізу

Назва	Переваги	Проблеми
MEC	Швидка аналітика даних, що покращує загальну ефективність додатків у режимі реального часу; Зменшення мережного трафіку; Наявність однієї точки відмови та адаптація розподілених обчислень; Можливість віртуалізації мережевих ресурсів; Покращення параметрів якості обслуговування (QoS) за рахунок мінімізації відстані, на яку відбувається передача даних; Підвищений рівень надійності, за рахунок встановлення додатків у безпосередній близькості від кінцевого пристрою.	Шлях між пристроєм кінцевого користувача та місцем розміщення даних часто довгий і недосконалий; Чим ближче обчислювальні ресурси знаходяться до користувача, тим складніше стає питання більш зручного місця розташування цих ресурсів; Не завжди можливо отримати достатню кількість каналів подвійної потужності;
SDN/NFV	Гнучкість – дозволяє швидко та легко розгорнути мережу та розпочати її експлуатацію; Ціна – зниження витрат на управління наданими послугами і управлінням всією мережею; Масштабованість – дозволяють протягом дня збільшувати або зменшувати обсяг використовуваних ресурсів того самого апаратного забезпечення залежно від навантаження; Безпека – за рахунок поділу та ізоляції сегментів мережі	Стандарти ще не до кінця розроблені, що спричиняє проблеми сумісності реалізацій; Проблеми міграції – традиційної мережної інфраструктури до архітектури NFV/SDN; Наявність власних дата-центрів у операторів, або доступність дата-центрів у хмарних провайдерів для аутсорсингу ресурсів стандартних серверів та систем зберігання даних.
MIMO	Поліпшення пропускної спроможності, без розширення полоси пропускання; Якість сигналу, що передається, і швидкість передачі даних; Антенні формують спрямований сигнал і завдяки цьому відбувається збільшення дальності дії мережі.	Швидкість та якість обробки сигналу залежить від підключеної техніки; Неможливість розташування пристроїв у невеликій близькості один від одного. Погано працює, якщо джерело або приймач сигналу переміщається.
D2D	D2D пристрої підтримують високу швидкість передачі даних та низькі наскрізні затримки завдяки прямому обміну на коротких відстанях та менш енерговитратно встановлювати зв'язок між собою, ніж встановлювати з'єднання через базову мережу; D2D дозволяє розвантажити трафік базової мережі, зменшити її навантаженість, звільнивши ресурс для пристроїв, що не використовують D2D з'єднання;	Інтеграція режиму D2D із дуплексною структурою UL/DL. Перспективи дизайну інтерфейсу D2D-пристроїв (як з апаратної сторони, так і з погляду протоколу) забезпечення необхідної гнучкості як функцій фізичного рівня, так управління доступом до середовища (Media Access Control, MAC).

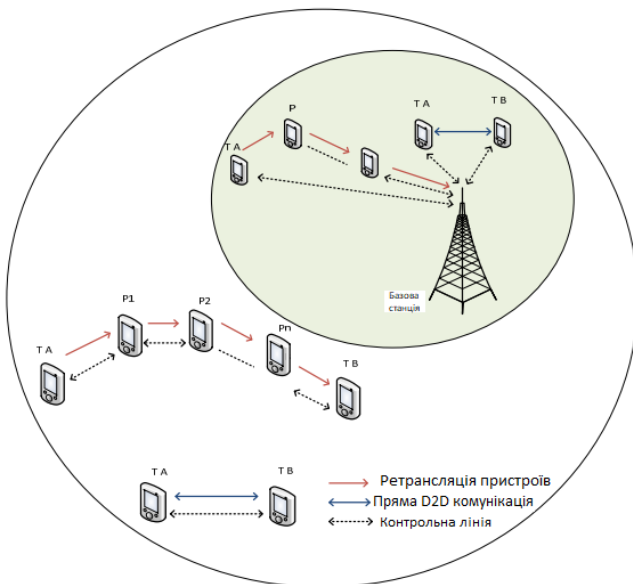


Рис. 4. Типи з'єднань технології D2D у мережі Тактильного Інтернету

Застосування кластеризації і транзитних пристроїв дозволяють в ряді випадків розширити зону зв'язку мережі або підвищити якість обслуговування (QoS) трафіку.

Потенційно, при досить високій щільності вузлів мережі, застосування D2D взаємодій дозволяє організувати маршрути доставки повідомлень, тобто ad hoc мережі.

#### Вимоги до мереж підтримки Тактильного Інтернету

З огляду на результати аналізу, що наведено у попередніх підрозділах, можна сформулювати наступні вимоги, що пред'являються до мереж підтримки Тактильного Інтернету:

- висока швидкість підключення – затримки менше 1 мс;
- висока надійність з'єднання – неприпустимі втрати сигналу в мережі, відмова обладнання у заданих умовах протягом заданого часу; конкретні вимоги до надійності відрізняються у різних видів послуг та додатків;
- безпека та конфіденційність є також ключовими вимогами для реалізації Тактильного Інтернету; враховуючи суворе обмеження часу очікування, засоби безпеки повинні підтримуватися фізично і мати низьке обчислювальне навантаження; зокрема, для цілей ідентифікації користувача можуть бути використані такі фізичні характеристики, як відбитки пальців, малюнок райдужної оболонки ока, модель поведінки користувача, які неможливо чи складно клонувати;
- стандартизація – засоби Тактильного Інтернету повинні обробляти тактильну інформацію так само, як і звичайну аудіо/відео інформацію; стандарти кодеків повинні бути схожими з сучасними аудіо та відео кодеками, для полегшення передачі «тактильних» даних через мережу з пакетною комунікацією.

#### Визначення факторів, що впливають на зниження ефективності Тактильного Інтернету

У комп'ютерних мережах повинні бути розглянуті три основні затримки: час відгуку клієнта, затримка на рівні користувача та затримка під час керування. Час відгуку клієнта – це час від початку передачі пакета даних на прикладному рівні передавача до прийому даних на прикладному рівні приймача. До неї входять усі затримки, а саме: затримка у черзі, затримка обробки, затримка обчислень, затримка передачі, затримка розповсюдження, затримка повторних передач та затримка прийому. Час відгуку клієнта а в основному залежить від відстані та числа вузлів мережі, що беруть участь у процесі взаємодії.

Якість каналу між двома сусідніми вузлами залежить від ряду факторів, що впливають на поширення радіосигналу і його обробку в радіоприймальному пристрої.

В першу чергу, це фактори, що впливають на відношення сигнал/шум (шум + перешкода), такі як відстань, що визначає загасання сигналу в середовищі поширення і перешкоди, які мають місце в точці прийому.

В умовах мережі високої щільності слід очікувати, що найбільша частка перешкод буде створюватися сусідніми вузлами мережі (внутрішньоканальні перешкоди).

Завдання виконання вимог за величиною затримки 1мс накладає великі обмеження на системно-мережні рішення щодо побудови комп'ютерних мереж. За рахунок впровадження нових технологій телекомунікацій, таких як програмно-конфігуровані мережі (SDN), віртуалізація мережних функцій (NFV) та мобільні граничні обчислення (MEC) можна буде зменшити час відгуку клієнта, оскільки кінцевому користувачеві надається можливість обмінюватися даними з хмарою, розташованою на межі мережі (на мережі радіодоступу (RAN)) [5]. Затримка поширення – це час між передачею сигналу від ведучого пристрою базового домену до прийому його веденим пристроєм виконавчого домену. Тривалість цього часу в основному залежить від середньої відстані [4]. Оскільки крім затримки поширення є й інші затримки, затримка 1мс може бути досягнута тільки для взаємодій відносно на короткі відстані.

Для вирішення поставлених завдань необхідні поєднання ущільнення мережі, розвантаження та більша ефективність спектру.

Результативні можливості для великої кількості спектрів включають більш високу частоту смуги пропускання та агрегацію фрагментованих ресурсів спектра із використанням методів агрегації носіїв. Агреговане використання спектра може бути застосоване для подвійного зв'язку терміналів з декількома базовими станціями. Підвищення спектральної ефективності може бути реалізовано за рахунок таких надійних методів фізичного рівня, як 256-квадратурна амплітудна модуляція (QAM), схе-

ми модуляції більш високого порядку і схеми кодування (MCS). Також вони можуть бути об'єднані з

MIMO для збільшення пропускної здатності системи (рис. 5).

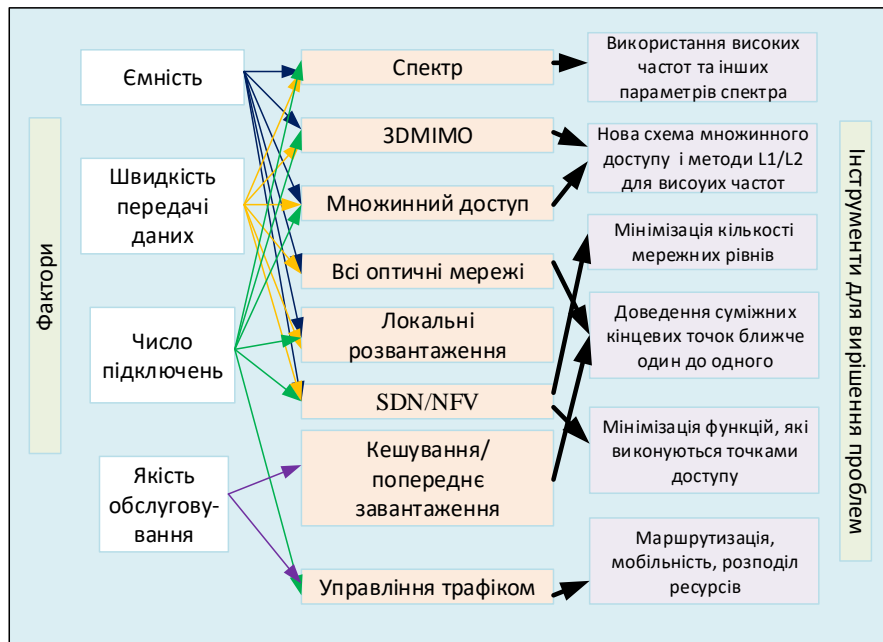


Рис. 5. Фактори що впливають на зниження ефективності Тактильного Інтернету

## Висновки

В даній статті розглянуто основні рівні системи Тактильного Інтернету засновані на структурі мережі 5G. Проведено аналіз технологій для реалізації

концепції ТІ, виявлено основні переваги, а також проблеми даних технологій, що вимагають подальшого їх дослідження. Розглянуто вимоги до мереж підтримки ТІ та визначено фактори, що впливають на зниження ефективності Тактильного Інтернету.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ярошевич, Р.О. Аналіз підходів до мінімізації затримок тактильного інтернету у комп'ютерних мережах / Р.О. Ярошевич, А.А. Коваленко // Проблеми інформатизації. Тези доповідей дев'ятої міжнародної НТК. – Черкаси: ЧДТУ; Харків: НТУ «ХПІ»; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТІГН; Харків: ДП «ПД ПКНДІ АП», 2021. – 18-19 листопада 2021. – С. 101.
2. Tehrani M. N., et al. Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 5. pp. 86–92.
3. Ateya A. A., Vybornova A., Kirichek R., Koucheryavy A. Multilevel Cloud Based Tactile Internet System // Proc. of 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT) 2017. pp. 105–110.
4. Volkov, A., Ateya, A. A., Muthanna, A., Kirichek, R. MEC and SDN/NFV as a Solution for Providing 1ms in 5G/IMT-2020 Communication Networks // 73rd All-Russian Scientific-Technical Conference, Dedicated to the Day of Radio. 2018. Pp. 192–193.
5. Sharma, S.K., Woungang, I., Anpalagan, A., Chatzinotas, S. (2020). Toward Tactile Internet in beyond 5G era: recent advances current issues, and future directions. Ieee Access, 8, 56948-56991.

Received (Надійшла) 04.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.03.2022

## Analysis of technologies to increase the efficiency of Tactile Internet in computer networks

R. Yaroshevych, A. Kovalenko

**Abstract.** The purpose of this work is to analyze the technologies that can improve the efficiency of Tactile Internet (TI) in computer networks. The concept of TI has developed due to the emergence and development of technologies that require very little delay in data delivery. This is primarily a service with certain requirements for interactivity. In particular, it can be a variety of control systems associated with the transfer of tactile sensations from the actuators and sensors to the controls. To increase the efficiency of TI, a number of promising technologies are being considered today, such as Device-to-Device (D2D) technology, without the use of a base station, which allows you to effectively build ultra-dense computer networks. Technologies such as MEC (Mobile Edge Computing), software-configured SDN (Software Defined Networks) and NFV (Network Functions Virtualization) network virtualization are of great importance for building networks with low delays. Low latency computer networks, which are based on the concept of Tactile Internet, are of great importance when choosing a method of building computer networks. This article considers various technologies and analyzes the main advantages and problems of these technologies, which require further study.

**Keywords:** Tactile Internet, computer network, Network Functions Virtualization Software Defined Networks.

Г. В. Іванець<sup>1</sup>, М. Г. Іванець<sup>2</sup>, І. О. Толкунов<sup>1</sup>, І. І. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПОПАРНОГО ВРАХУВАННЯ АРГУМЕНТІВ

**Анотація.** Ефективність планування та реалізації заходів щодо запобігання надзвичайним ситуаціям природного характеру визначається якістю прогнозування загроз їх виникнення. Запобігання надзвичайним ситуаціям ґрунтується на аналізі та точності прогнозуванні можливості виникнення подібних надзвичайних ситуацій. В статті обґрунтовано вибір моделі зміни узагальненого параметру процесу зміни надзвичайних ситуацій природного характеру. В якості узагальненого параметру розглядається кількість надзвичайних ситуацій за деякий проміжок часу. Із врахуванням дії всіх дестабілізуючих факторів цей процес доцільно представити у вигляді адитивної суміші систематичної складової, яка характеризує незворотні процеси дрейфу параметрів, періодичної і випадкової складових. Оцінка всіх трьох складових процесу зміни надзвичайних ситуацій природного характеру дозволить не тільки здійснити прогнозування по кожній із них, але й глибше проаналізувати причини виникнення надзвичайних ситуацій. Розроблена методика підвищення точності прогнозування надзвичайних ситуацій природного характеру на основі методу попарного врахування аргументів. Методика дозволяє підвищити точність прогнозування надзвичайних ситуацій природного характеру за рахунок оцінки систематичної та періодичної складових, а також прогнозування випадкової складової процесу зміни природних надзвичайних ситуацій. Проведені експериментальні дослідження показали ефективність застосування методу попарного врахування аргументів для прогнозування випадкової складової процесу виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру на основі розробленої методики. При цьому точність прогнозу кількості надзвичайних ситуацій в порівнянні з статистико-ймовірним методом прогнозу підвищилась майже в 1,7 рази. Це дозволяє обґрунтовано підходити до планування та проведення організаційно-технічних заходів, спрямованих на запобігання та ліквідацію наслідків надзвичайних ситуацій як в масштабах держави, так і її регіонів.

**Ключові слова:** надзвичайна ситуація, узагальнений параметр, систематична складова, періодична складова, випадкова складова, модель, метод попарного врахування аргументів.

### Вступ

Захист населення та територій від надзвичайних ситуацій (НС) є однією з основних задач системи цивільного захисту (ЦЗ) держави. Забезпечення безпеки при НС вимагає надійного функціонування системи реагування, адекватної рівням і характеру загроз [1].

В останні п'ять років у всьому світі спостерігається різкі зміни клімату, підвищення рівня сейсмічної активності земної кори, підвищення епідеміологічного захворювання людей, зростання розмірів та потужності технічних систем, прогресуючого втручання людини в природу, що збільшує ризики виникнення різноманітних природних катастроф [2]. Це в свою чергу призводить до збільшення кількості та масштабів НС природного характеру, які негативно впливають на оточуюче навколишнє середовище [3, 4] та економіку різних країн [5, 6], супроводжуються не тільки матеріальними, але й людськими втратами.

Наявність в Україні значних територій з несприятливим природним впливом та схильністю до проявів небезпечних природних явищ підсилює гостроту проблеми забезпечення національної безпеки держави з метою сталого розвитку країни. Наприклад, тільки за останні п'ять років в Україні виникло 418 НС природного характеру, серед яких спостерігається тенденція зростання кількості метеорологічних НС, НС унаслідок лісових пожеж та медико-біологічних НС [7, 8]. Рівень природної небезпеки визнача-

ється чинниками природного походження, які виникають на території України. Різноманіття даних чинників та їх співвідношення вказує на різноманітність регіонів України за видами природної небезпеки та за ступенем їх впливу на життєдіяльність населення України [9]. В природній сфері негативна дія цих чинників підсилюється природними особливостями території України, несприятливими наслідками глобальних змін клімату, не виконанням норм та правил безпечного проведення господарської діяльності на небезпечних природних територіях.

НС, підпорядковуючись об'єктивним та людським факторам виникнення, постійно змінюються і в першу чергу це відноситься до методів, форм та засобів їх подолання. На сьогоднішній день для успішної діяльності щодо подолання або попередження наслідків НС необхідний прогноз можливого протікання тих чи інших негативних процесів, розробка та удосконалення інструментів та способів зміни ситуації в бажаному напрямку.

Територія України, як система з територіально-часовим розподілом параметрів життєдіяльності, в процесі свого функціонування та розвитку створює умови для виникнення загроз, які негативно впливають на стан природного екологічного середовища.

Для підрозділів ЦЗ не можливе будь-яке експериментування над НС. Тому важливе значення набуває математичне моделювання, яке дає змогу вивчати явища без проведення експериментів над ними.

В умовах часткової невизначеності зв'язків між досліджуваними параметрами протікання негативних процесів та факторів, що впливають на них, виникає проблема вибору структури моделі і методів прогнозування. Вони повинні найбільш точніше описувати та пояснювати процеси на основі статистичних даних моніторингу з наступним аналізом для прийняття адекватних і обґрунтованих рішень [10]. Будь-яке дослідження завжди об'єднує математичні моделі та статистичні дані. Статистичні дані є чисельними характеристиками можливості виникнення або протікання НС. Вони формуються під впливом багатьох факторів, які не завжди можна проконтролювати ззовні. Не контрольовані фактори можуть приймати випадкові значення і тим самим обумовлювати випадковість даних. В цих умовах дуже важливо вибрати такі методи прогнозування, які найбільш точно могли б описати залежність результуючих змінних від множини контрольованих факторів, що впливають на них.

Виходячи з цього, розробка методики підвищення точності прогнозування НС природного характеру на основі методу попарного врахування аргументів є актуальною науково-практичною задачею в сфері ЦЗ.

**1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Практика останніх років показує сильний вплив на економіку України НС природного характеру різних видів. Це вимагає системної діяльності відносно боротьби з цими стихіями. Важливим аспектом цієї діяльності є своєчасне прогнозування можливості виникнення НС з метою завчасного планування заходів щодо попередження чи мінімізації їх наслідків.

Методи прогнозування НС залежать від наявної статистичної інформації про НС та динаміку їх розвитку за деякий попередній період моніторингу, а також причини та фактори, які зумовлюють виникнення НС різного характеру.

Аналіз літературних джерел [11,12] свідчить про те, що в більшості випадків для прогнозування НС природного характеру використовуються імовірно-статистичний, імовірно-детермінований, детерміновано-імовірнісний методи прогнозування. Але при застосуванні цих методів виникають складності розробки моделей процесів виникнення НС, що значно знижує якість проведення аналізу розвитку даних процесів в динаміці.

В роботі [13,14] автори пропонують використовувати для прогнозування НС різні варіації регресійних моделей (лінійні, нелінійні, ступеневі, порядкові, авторегресійні і так далі). Недоліками лінійних регресійних моделей є низька адаптивність і відсутність спроможності моделювання нелінійних процесів. Основним недоліком нелінійних регресійних моделей [15] є складність визначення виду функціональної залежності, а також труднощі визначення параметрів моделі.

Методики прогнозування ризиків, пов'язаних з НС внаслідок лісових пожеж, розглянуті в роботі [16]. Але при цьому математичне описування взаємозв'язків фізичних процесів на різних стадіях

виникнення та протікання НС даного виду не запропоновано.

Процеси виникнення природних НС, зазвичай, є нелінійними. Для моделювання таких процесів автори [17] пропонують використовувати нейромережові моделі. Недоліками таких моделей є відсутність прозорості моделювання, складність вибору архітектури та алгоритму навчання нейронної мережі.

Авторами роботи [18] розглянута важливість точного прогнозування НС, пов'язаних з паводками, але ніяких методів та способів прогнозування не запропоновано.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел показує, що при прогнозуванні НС природного характеру не завжди враховуються тенденції періодичних змін НС та можливість прогнозування випадкової складової процесу виникнення подібних НС. Це вказує на необхідність розробки методики підвищення точності прогнозування НС природного характеру за рахунок використання методу попарного врахування аргументів для прогнозу випадкової складової процесу виникнення природних НС.

**2. Мета та завдання дослідження.** Мета дослідження полягає в розробці методики підвищення точності прогнозування НС природного характеру на основі методу попарного врахування аргументів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати вибір моделі узагальненого параметру процесу зміни НС природного характеру;
- розробити методику підвищення точності прогнозування НС природного характеру на основі методу попарного врахування аргументів;
- перевірити ефективність застосування методики для прогнозування НС природного характеру.

## Результати досліджень

**1. Обґрунтування вибору моделі узагальненого параметру процесу зміни надзвичайних ситуацій природного характеру.** Для прогнозування НС за узагальненими параметрами необхідно знати залежність його від дії негативних дестабілізуючих факторів. До узагальненого параметру [10] висуваються наступні вимоги: вибраний показник повинен відображати основні закономірності виникнення НС і відповідати меті дослідження; повинен характеризувати процес виникнення НС як єдине ціле; повинен забезпечувати можливість одержання кількісної оцінки з необхідною точністю.

В якості узагальненого параметру процесу виникнення НС природного характеру будемо розглядати їх кількість за деякий проміжок часу (наприклад за рік). Із врахуванням дії всіх дестабілізуючих факторів цей процес доцільно представити у вигляді адитивної суміші систематичної складової, яка характеризує незворотні процеси дрейфу параметрів, періодичної і випадкової складових [10]:

$$n_{ПХ}(t) = C(t) + X(t) + \xi(t), \quad (1)$$

де  $n_{ПХ}(t)$  – функція – зміни кількості НС;  $C(t)$  – систематична (не випадкова) складова процесу зміни кількості НС;  $X(t)$  – періодична (не випадкова) складова



процесу зміни кількості НС;  $\xi(t)$  – випадкова складова процесу зміни кількості НС.

Така модель дозволить найбільш повно врахувати вплив всіх дестабілізуючих факторів на процес зміни НС природного характеру.

Систематичну складову (тренд)  $C(t)$  описують лінією регресії у вигляді степеневого поліному:

$$C(t) = r_0 + r_1 t + r_2 t^2 + \dots + r_k t^k. \quad (2)$$

Ступінь поліному вибирається таким чином, щоб кількість заданих точок була в п'ять разів вище ступеня полінома. Коефіцієнти полінома можна знайти методом найменших квадратів (МНК) [10].

Після оцінки і вилучення її з реалізації процесу  $n_{ПХ}(t)$  вирішується задача виявлення та оцінки періоду і значень періодичної складової. Нехай  $Y(t) = n_{ПХ}(t) - C(t)$  випадкова реалізація після вилучення систематичної складової, яка містить суму періодичної та випадкової складових. В подальшому для зручності проведення досліджень значення реалізацій  $Y(t)$ ,  $X(t)$ ,  $\xi(t)$  за період моніторингу будемо представляти у вигляді матриць  $Y$ ,  $X$  та  $\xi$ . З врахуванням цього модель процесу  $Y(t)$  представимо у вигляді:

$$Y = 1 \otimes X + \xi, \quad (3)$$

де  $Y = (y_0, y_1, \dots, y_{n-1})^T$  – матриця значень випадкової реалізації після вилучення систематичної складової розмірністю  $n \times 1$ ;  $1 = (1, 1, 1, \dots, 1)^T$  – матриця розмірністю  $q \times 1$ ;  $\xi = (\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n-1})^T$  – матриця значень випадкової складової розмірністю  $n \times 1$ ;  $X = (x_0, x_1, \dots, x_{p-1})^T$  – матриця значень періодичної складової за період розмірністю  $p \times 1$ ;  $\otimes$  – символ добутку Кроннекера;  $n = q \cdot p$  – тривалість моніторингу;  $p$  – період періодичної складової;  $q$  – кількість періодів періодичної складової в реалізації.

Задача виявлення та оцінки періодичної складової [19] зводиться до задачі перевірки статистичних гіпотез. Знайдемо логарифм відношення правдоподібності

$$\ln l(Y) = \ln(P_y(Y/X \neq 0)/P_y(Y/X = 0)), \quad (4)$$

де 
$$P_y(Y/X \neq 0) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-n} \times \exp\{-0,5 \cdot \sigma^{-2} \cdot (Y - 1 \otimes X)^T (Y - 1 \otimes X)\}$$
 – умовна

щільність розподілу дискретних значень  $Y$  при наявності в реалізації періодичної складової (функція правдоподібності);

$P_y(Y/X = 0) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-n} \cdot \exp\{-0,5 \cdot \sigma^{-2} \cdot Y^T Y\}$  – умовна щільність розподілу дискретних значень  $Y$  при відсутності в реалізації періодичної складової,

$$\ln l(Y) = 0,5 \cdot \sigma^{-2} \cdot [2Y^T (1 \otimes X) - q(X^T X)]. \quad (5)$$

В подальшому логарифм відношення правдоподібності будемо позначати  $\ln l$ .

В якості критерію для перевірки справедливості висунутої гіпотези використовується випадкова величина  $d$ , яка підпорядкована розподілу  $\chi^2$  [19]:

$$d = \sum_{i=0}^{p-1} \left( \sqrt{q/\sigma^2} \cdot \hat{x}_i \right)^2, \quad (6)$$

де  $\hat{\sigma}^2$  – оцінки дисперсії  $\sigma^2$  для різних значень  $p$ .

Оцінка дисперсії знаходиться у відповідності з виразом:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} (Y - 1 \otimes \hat{X})^T (Y - 1 \otimes \hat{X}). \quad (7)$$

де  $\hat{X}$  – матриця оцінок значень дискретних відліків періодичної складової за період.

Якщо статистичне значення логарифма відношення правдоподібності перевищує критичне значення  $d$  (порог), тоді приймається рішення про наявність періодичної складової з періодом  $\hat{p}$ , а оцінки її значень розраховуються у відповідності з виразом:

$$\hat{x}_i = \frac{1}{q} \sum_{s=0}^{q-1} y_{i+sp}, \quad (8)$$

де  $i = 0, 1, 2, \dots, (p-1)$ .

Позначимо через  $\xi = Y - X$  випадкову складову процесу зміни узагальненого параметру і будемо розглядати її як стаціонарний випадковий процес з математичним очікуванням рівним нулю. В такому випадку для прогнозу випадкової складової можна використати метод групового врахування аргументів (МГВА), зокрема метод попарного врахування аргументів (МПВА) [10]. МПВА полягає в рекурентному вирішенні кількох систем нормальних рівнянь, складених для кожної пари аргументів і для нових допоміжних змінних.

Таким чином, з врахуванням дії всіх дестабілізуючих факторів процес зміни узагальнених параметрів НС природного характеру доцільно представити у вигляді адитивної суміші систематичної складової, яка характеризує незворотні процеси дрейфу параметрів, періодичної і випадкової складових. Оцінка всіх трьох складових процесу зміни НС природного характеру дозволить не тільки здійснити прогнозування по кожній із них, але й глибше проаналізувати причини виникнення НС природного характеру.

**2. Розробка методики підвищення точності прогнозування надзвичайних ситуацій природного характеру на основі методу попарного врахування аргументів.** Методику підвищення точності прогнозування кількості НС природного характеру за рахунок врахування випадкової складової цього процесу на основі МППВА розглянемо на конкретному прикладі.

Динаміка зміни кількості НС природного характеру в Україні за 1997-2020 роки [7, 8] представлена на рис. 1. Для дослідження скористаємося фактографічною інформацією про НС природного характеру за період з 1997 по 2013 роки.

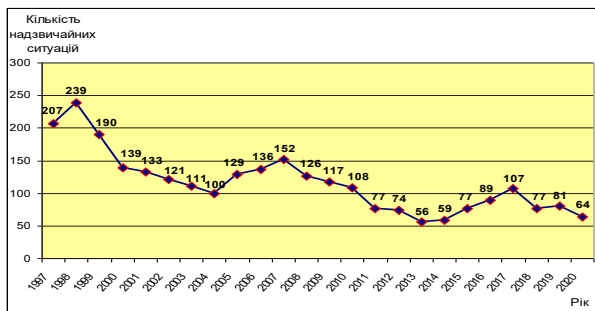


Рис. 1. Динаміка зміни кількості надзвичайних ситуацій природного характеру на протязі 1997-2020 років

Кожного разу всі наявні дані будемо використовувати для вираження коефіцієнтів поліномів, а дані за останній рік залишаємо для перевірки точності (тобто за даними попередніх 16 років на 17 рік).

Оцінка систематичної складової. Систематичну складову (тренд)  $C(t)$  описують лінією регресії у вигляді ступеневого поліному. Оскільки довжина вхідної реалізація  $n_{ПХ}(t)$   $n = 15$  ( $t = 1, 2, 3, \dots, 16$ ), то систематична складова  $C(t)$  представляє поліном третього ступеня вигляду:

$$C(t) = 290,7335 - 57,5006t + 6,4300t^2 - 0,2321t^3. \quad (9)$$

Графік систематичної складової зображено на рис. 2.

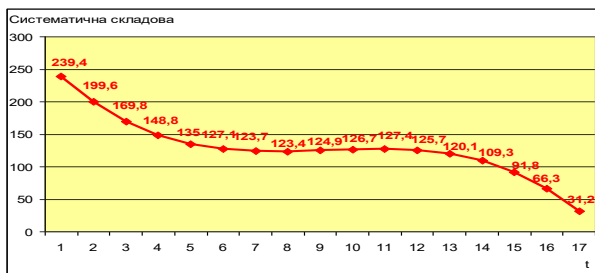


Рис. 2. Графік систематичної складової процесу виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру

На графіку точка 1 відповідає 1997 року і так далі, а точка 17 – відповідно 2013 року. Систематична складова (тренд) є не випадковою і одержане рівняння дозволяє робити прогноз її значення як мінімум на рік вперед.

Виявлення періодичної складової процесу виникнення НС. Після оцінки і вилучення з реалізації  $n_{ПХ}(t)$  систематичної складової виникає задача виявлення та оцінки періоду і дискретних значень відліків періодичної складової.

Графік випадкового процесу після вилучення систематичної складової зображено на рис. 3.

Найбільше значення логарифму відношення правдоподібності спостерігається при  $p = 8$ , тобто в реалізації кількість періодів  $q = 2$ . При цьому маємо:

1. Оцінки дискретних значень відліків періодичної складової при  $p = 8$ :

$$\hat{X} = \begin{pmatrix} -14,2 & 22,4 & 22,4 & -4,7 \\ -2,5 & -3,7 & -13,8 & -7,9 \end{pmatrix}^T. \quad (10)$$

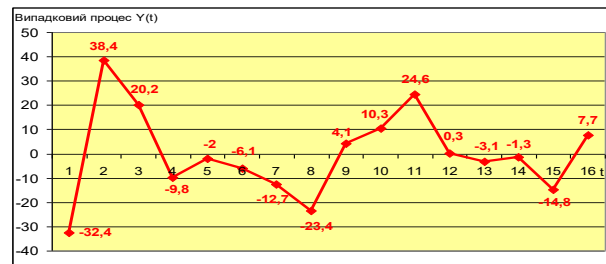


Рис. 3. Графік реалізації випадкового процесу після вилучення систематичної складової зміни надзвичайних ситуацій природного характеру

2. В даному випадку значення випадкової величини  $d = 15,8$ .

3. Поріг виставляємо для даного  $p = 8$  з надійністю  $P = 0,95$  (рівень значимості  $\alpha = 0,05$ ) у відповідності з розподілом  $\chi^2$ , значення якого дорівнює 15,5.

4. Оскільки статистичне значення критерію  $d$  для максимального значення логарифму відношення правдоподібності перевищує поріг виявлення, тоді з вірогідністю  $P = 0,95$  можна стверджувати, що у випадковому процесі присутня періодична складова, а оцінка її періоду  $\hat{p} = 8$ . Графік періодичної складової зображено на рис. 4.

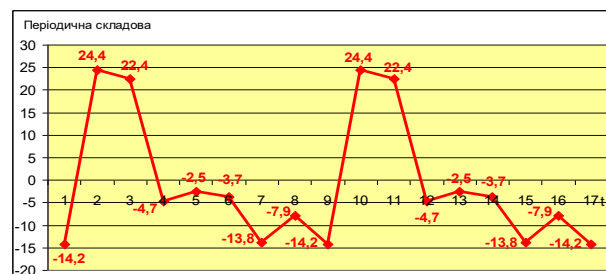


Рис. 4. Графік періодичної складової процесу виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру

Прогнозування випадкової складової процесу виникнення НС. Після оцінки і вилучення з реалізації  $n_{ПХ}(t)$  систематичної та періодичної складових виникає задача прогнозу випадкової складової. Графік випадкової складової зображено на рис. 5.

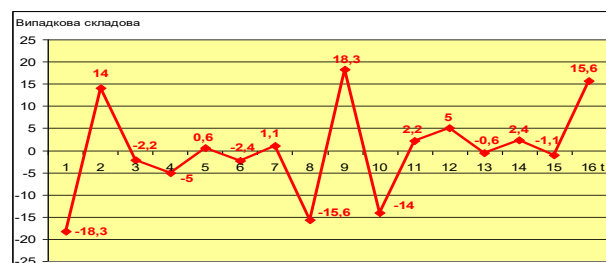


Рис. 5. Графік випадкової складової процесу виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру

Прогнозування випадкової складової зміни НС природного характеру виконаємо у відповідності з методом МПВА. Вибір структури і параметрів

моделі випадкової складової  $\xi(t)$  здійснюється на основі інформації короткої вибірки фактографічних даних про НС. Максимальна можлива точність прогнозу досягається за допомогою ряду підрахунків при різних значеннях коефіцієнтів відбору даних, тобто оптимального виставлення порогів. Для прогнозування випадкової складової  $\xi(t)$  процесу  $n_{ПХ}(t)$  виберемо час передісторії в п'ять років і будемо враховувати залежність випадкової складової  $\xi(t)$  від кількості НС різних видів природного характеру і їх відхилень від своїх нелінійних трендів. Спочатку виконаємо відбір корисних даних для прогнозу випадкової складової  $\xi(t)$ .

Перший відбір даних (за довжиною врахованої передісторії). Перший відбір даних проводиться за кількістю вхідних даних за останні п'ять років. Позначимо через  $N_0$  максимально можливу кількість вихідних даних (ознак) за період моніторингу НС:

$$N_0 = N_{01} \cdot T = 192, \quad (11)$$

де  $N_0 = 192$  – максимально можлива кількість ознак за період моніторингу;  $N_{01} = 12$  – кількість враховуваних змінних ( $\xi_0(t)$  – нелінійний тренду для випадкової складової;  $\Delta\xi(t)$  – відхилення випадкової складової від свого нелінійного тренду;  $v_1(t)$  – кількість НС геологічного характеру за кожний рік спостереження;  $\Delta v_1(t)$  – відхилення кількості НС геологічного характеру від свого нелінійного тренду;  $v_2(t)$  – кількість НС метеорологічного характеру за кожний рік спостереження;  $\Delta v_2(t)$  – відхилення кількості НС метеорологічного характеру від свого нелінійного тренду;  $v_3(t)$  – кількість НС гідрологічного характеру за кожний рік спостереження;  $\Delta v_3(t)$  – відхилення кількості НС гідрологічного характеру від свого нелінійного тренду;  $v_4(t)$  – кількість НС, пов'язаних з пожежами в природних екологічних системах, за кожний рік спостереження;  $\Delta v_4(t)$  – відхилення кількості НС, пов'язаних з пожежами в природних екологічних системах, від свого нелінійного тренду;  $v_5(t)$  – кількість НС медико-біологічного характеру за кожний рік спостереження;  $\Delta v_5(t)$  – відхилення кількості НС медико-біологічного характеру від свого нелінійного тренду);  $T = 16$  – період моніторингу (16 попередніх років).

З врахуванням цього коефіцієнт першого відбору даних (ознак) буде дорівнювати:

$$k_1 = \frac{t_1}{T} = 0,3125, \quad (12)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт першого відбору даних;  $t_1 = 5$  – враховуваний час передісторії.

Тоді число ознак, які будуть використані в подальшому, дорівнює:

$$N_1 = k_1 \cdot N_0 = 60, \quad (13)$$

де  $N_1$  – число враховуваних ознак після першого відбору даних. До цих 60 ознак увійдуть 30 значень змінних і 30 значень їх відхилень від своїх нелінійних трендів за останні п'ять років. Графіки цих ознак наведені на рис. 6-11.

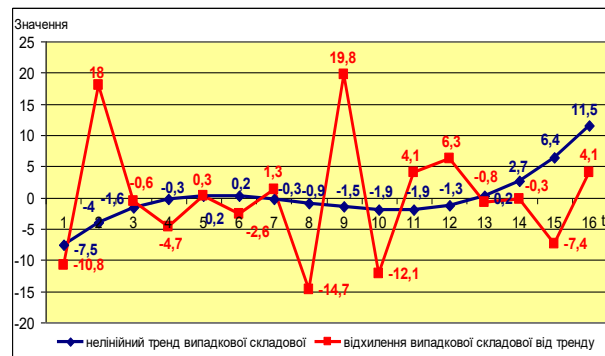


Рис. 6. Графік нелінійного тренду та відхилень випадкової складової від нього



Рис. 7. Графік геологічних надзвичайних ситуацій та їх відхилень від нелінійного тренду

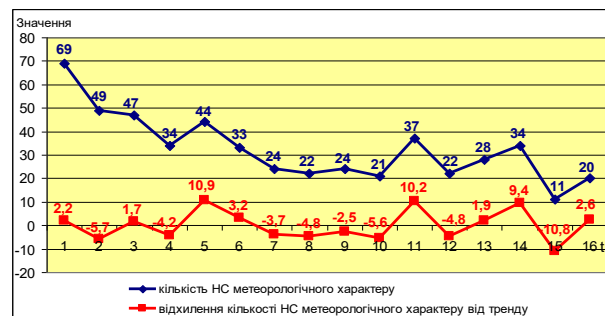


Рис. 8. Графік метеорологічних надзвичайних ситуацій та їх відхилень від нелінійного тренду

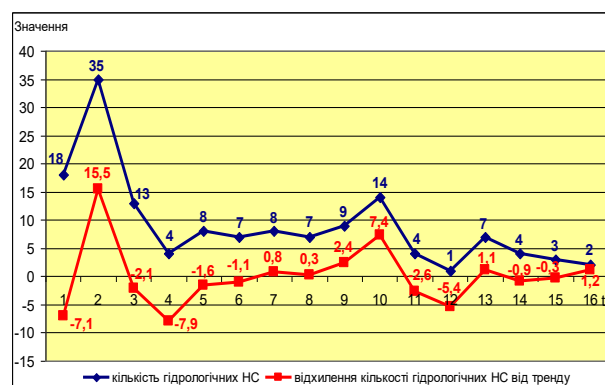


Рис. 9. Графік гідрологічних надзвичайних ситуацій та їх відхилень від нелінійного тренду



Рис. 10. Графік надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежами в природних екосистемах, та їх відхилень від нелінійного тренду



Рис. 11. Графік НС медико-біологічних надзвичайних ситуацій та їх відхилень від нелінійного тренду

Другий відбір даних (за коефіцієнтами взаємної кореляції ознак). Другий відбір парних ознак виконуємо на підставі підрахунку коефіцієнтів кореляції випадкової складової і всіх ознак, що пройшли перший відбір. Для розрахунку коефіцієнтів заповнюємо таблицю 1, в якій вказані змінні, що нас цікавлять, взяті зі зсувом на один, два, три, чотири і п'ять років назад. За величиною коефіцієнта взаємної кореляції ознак (не враховуючи його знака), залишаємо дванадцять ознак ( $N_2 = 12$ ), коефіцієнти кореляції яких перевищують або дорівнюють порогу. На основі експериментальних досліджень порогове значення коефіцієнта кореляції вибрано  $\Theta_2 = 0,35$ , при якому похибки прогнозу найменші. Коефіцієнт взаємної кореляції обчислюється на підставі виразу:

$$K_{\xi v_i}(k) = \frac{\sum_{t=k+1}^n \xi(t) \cdot v_i(t-k)}{\sqrt{\sum_{t=k+1}^n \xi^2(t) \sum_{t=k+1}^n v_i^2(t-k)}}, \quad (14)$$

де  $k = 1, 2, \dots, 5$  ( $n = 16$ ).

За величиною коефіцієнта кореляції (табл. 1) проходять такі ознаки:

$$\begin{aligned} B_1(t) &= \xi_0(t-2); B_2(t) = \xi_0(t-1); B_3(t) = \Delta \xi_0(t-1); \\ B_4(t) &= v_5(t-5); B_5(t) = v_3(t-5); B_6(t) = v_2(t-5); \\ B_7(t) &= v_2(t-2); B_8(t) = \xi_0(t-3); \\ B_9(t) &= v_4(t-2); B_{10}(t) = \Delta v_2(t-4); \\ B_{11}(t) &= \Delta v_2(t-3); B_{12}(t) = v_5(t-1). \end{aligned} \quad (15)$$

Таблиця 1 – Розрахунки коефіцієнтів взаємної кореляції

$k$	1	2	3	4	5
$\xi_0$	0,585539	0,624862	0,394268	0,02503	-0,11853
$\Delta \xi$	-0,51818	-0,12494	0,00244	0,040601	0,25384
$v_1$	-0,2046	-0,0541	0,088829	-0,12212	0,000365
$\Delta v_1$	-0,23004	-0,01013	0,084727	-0,26804	-0,06309
$v_2$	-0,13094	-0,40818	-0,17154	-0,17002	-0,41084
$\Delta v_2$	-0,08246	-0,20493	0,354934	0,379257	-0,02205
$v_3$	-0,21285	-0,26854	-0,21691	-0,15762	-0,42272
$\Delta v_3$	-0,14697	-0,00237	0,09935	0,165323	-0,15028
$v_4$	-0,11636	-0,38064	-0,08762	0,104779	0,278718
$\Delta v_4$	-0,06422	-0,31094	-0,01261	0,173388	0,343613
$v_5$	-0,35224	-0,1759	-0,28091	-0,22348	-0,43124
$\Delta v_5$	-0,23482	0,16229	0,030551	0,077988	-0,15836

Числа індексів в круглих дужках при змінних показують, на скільки років назад від прогнозованого року повинна бути виміряна та чи інша величина.

Отже коефіцієнт другого відбору  $k_2$  дорівнює:

$$k_2 = N_2 / N_1 = 0,2, \quad (16)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт другого відбору даних;  $N_1$  – число враховуваних ознак після першого відбору даних;  $N_2$  – число враховуваних ознак після другого відбору даних. Дванадцять змінних дають можливість написати шість різних поліномів Колмогорова-Габора для проміжних змінних, в яких будуть враховані дві змінні [10]:

$$\begin{aligned} \xi_{1,2}(t) &= l_{0(1,2)} + l_{1(1,2)} B_1(t) + l_{2(1,2)} B_2(t) + l_{3(1,2)} \times \\ &\times [B_1(t)]^2 + l_{4(1,2)} [B_2(t)]^2 + l_{5(1,2)} B_1(t) B_2(t); \\ \xi_{3,4}(t) &= l_{0(3,4)} + l_{1(3,4)} B_3(t) + l_{2(3,4)} B_4(t) + l_{3(3,4)} \times \\ &\times [B_3(t)]^2 + l_{4(3,4)} [B_4(t)]^2 + l_{5(3,4)} B_3(t) B_4(t); \\ \xi_{5,6}(t) &= l_{0(5,6)} + l_{1(5,6)} B_5(t) + l_{2(5,6)} B_6(t) + l_{3(5,6)} \times \\ &\times [B_5(t)]^2 + l_{4(5,6)} [B_6(t)]^2 + l_{5(5,6)} B_5(t) B_6(t); \\ \xi_{7,8}(t) &= l_{0(7,8)} + l_{1(7,8)} B_7(t) + l_{2(7,8)} B_8(t) + l_{3(7,8)} \times \\ &\times [B_7(t)]^2 + l_{4(7,8)} [B_8(t)]^2 + l_{5(7,8)} B_7(t) B_8(t); \\ \xi_{9,10}(t) &= l_{0(9,10)} + l_{1(9,10)} B_9(t) + l_{2(9,10)} B_{10}(t) + \\ &+ l_{3(9,10)} [B_9(t)]^2 + l_{4(9,10)} [B_{10}(t)]^2 + \\ &+ l_{5(9,10)} B_9(t) B_{10}(t); \\ \xi_{11,12}(t) &= l_{0(11,12)} + l_{1(11,12)} B_{11}(t) + l_{2(11,12)} B_{12}(t) + \\ &+ l_{3(11,12)} [B_{11}(t)]^2 + l_{4(11,12)} [B_{12}(t)]^2 + \\ &+ l_{5(11,12)} B_{11}(t) B_{12}(t). \end{aligned} \quad (17)$$

При обчисленні коефіцієнтів покладемо, що значення проміжних змінних дорівнюють значенням випадкової складової, тобто

$$\xi_{1,2}(t) = \xi(t), \xi_{3,4}(t) = \xi(t), \dots, \xi_{11,12}(t) = \xi(t).$$

Потім, знаючи коефіцієнти знаходимо  $\xi_{1,2}(t), \xi_{3,4}(t), \dots, \xi_{11,12}(t)$  як функції часу і використовуємо їх в подальшому. Коефіцієнти кожного із рівнянь одержимо на основі методу МНК. Для першого рівняння вираз для вектору коефіцієнтів має вигляд:

$$\bar{L}_1 = \left( \Pi_{1,2}^T \Pi_{1,2} \right)^{-1} \Pi_{1,2}^T \bar{\xi}, \quad (18)$$

де  $\bar{L}_1 = (l_{0(1,2)}, l_{1(1,2)}, \dots, l_{5(1,2)})^T$  – вектор коефіцієнтів розмірністю  $(6 \times 1)$ ;  $\bar{\xi} = (\xi_6, \xi_7, \dots, \xi_n)^T$  – вектор випадкової складової розмірністю  $(n - 5, 1)$ ;  $\Pi_{1,2}$  – матриця розмірністю  $(n - 5, 6)$ :

$$\Pi_{1,2} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & B_1(4) & B_2(5) & [B_1(4)]^2 & [B_2(5)]^2 & [B_1(4)][B_2(5)] \\ 1 & B_1(5) & B_2(6) & [B_1(5)]^2 & [B_2(6)]^2 & [B_1(5)][B_2(6)] \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & B_1(n-2) & B_2(n-1) & [B_1(n-2)]^2 & [B_2(n-1)]^2 & [B_1(n-2)] \times [B_2(n-1)] \end{bmatrix} \quad (19)$$

В результаті рішення вектор коефіцієнтів буде мати вигляд:

$$\bar{L}_1 = (-1,446 \quad -1,560 \quad 0,901 \quad -0,313 \quad 0,049 \quad 0,275)^T. \quad (20)$$

Аналогічно можна одержати значення коефіцієнтів для інших рівнянь:

$$\begin{aligned} \bar{L}_2 &= (165,452 \quad 10,123 \quad -2,828 \quad -0,172 \quad 0,011 \quad -0,163)^T; \\ \bar{L}_3 &= (85,555 \quad -4,683 \quad -2,925 \quad 0,168 \quad 0,432 \quad -0,051)^T; \\ \bar{L}_4 &= (71,511 \quad -4,469 \quad 4,958 \quad 0,068 \quad -0,249 \quad -0,202)^T; \\ \bar{L}_5 &= (12,094 \quad -0,440 \quad 3,015 \quad -0,002 \quad -0,043 \quad -0,124)^T; \\ \bar{L}_6 &= (-73,208 \quad 7,157 \quad 0,218 \quad -0,074 \quad 0,005 \quad -0,039)^T. \end{aligned} \quad (21)$$

Третій відбір даних (за коефіцієнтами кореляції проміжних змінних). Кореляційна, тобто синфазна, зміна якої-небудь з ознак при короткій вибірці даних може бути випадковим збігом. У таких випадках маємо так звану хибну кореляцію. Для зменшення імовірності врахування ознак, фізично не зв'язаних з передбачуваною величиною, необхідно провести ще один відбір корисних ознак за коефіцієнтами кореляції.

Для цього визначимо кореляцію випадкової величини з проміжними змінними  $\xi_{1,2}(t), \xi_{3,4}(t), \xi_{5,6}(t), \xi_{7,8}(t), \xi_{9,10}(t), \xi_{11,12}(t)$ , щоб надалі врахувати найбільш корельовані (тобто такі, що синфазно змінюються) із нею. Коефіцієнти кореляції випадкової величини  $\xi(t)$  із проміжними змінними  $\xi_{1,2}(t), \xi_{3,4}(t), \xi_{5,6}(t), \xi_{7,8}(t), \xi_{9,10}(t), \xi_{11,12}(t)$  наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти кореляції проміжних змінних

Проміжні змінні	Коефіцієнти кореляції
$\xi_{1,2}(t)$	0,824926
$\xi_{3,4}(t)$	0,836504
$\xi_{5,6}(t)$	0,939849
$\xi_{7,8}(t)$	0,754133
$\xi_{9,10}(t)$	0,748793
$\xi_{11,12}(t)$	0,877596

На основі експериментальних досліджень порогове значення коефіцієнта кореляції вибрано  $\Theta_3 = 0,8$ , при якому похибки прогнозу найменші. Тоді за величиною коефіцієнта взаємної кореляції проміжних змінних залишаться тільки чотири проміжні змінні ( $N_3 = 4$ ):варог

$$\begin{aligned} \xi_{5,6}(t) &= 85,55517 - 4,68296 \cdot [v_3(t-5)] - 2,92547 \times \\ &\times [v_2(t-5)] - 2,92547 \cdot [v_3(t-5)]^2 + 0,168495 \times \\ &\times [v_2(t-5)]^2 - 0,05061 \cdot [v_3(t-5)] \cdot [v_2(t-5)]; \\ \xi_{11,12}(t) &= -73,208 + 7,157 \cdot [\Delta v_2(t-3)] - 0,21765 \times \\ &\times [v_5(t-1)] - 0,07418 \cdot [\Delta v_2(t-3)]^2 + 0,005251 \times \\ &\times [v_5(t-1)]^2 - 0,03947 \cdot [\Delta v_2(t-3)] \cdot [v_5(t-1)]; \\ \xi_{3,4}(t) &= 165,452 + 10,1231 \cdot [\Delta \xi_0(t-1)] - 2,82801 \times \\ &\times [v_5(t-5)] - 0,17215 \cdot [\Delta \xi_0(t-1)]^2 + 0,010566 \times \\ &\times [v_5(t-5)]^2 - 0,16255 \cdot [\Delta \xi_0(t-1)] \cdot [v_5(t-5)]; \\ \xi_{1,2}(t) &= -1,4461 - 1,56025 \cdot [\xi_0(t-2)] + 0,901209 \times \\ &\times [\xi_0(t-1)] - 0,31267 \cdot [\xi_0(t-2)]^2 + 0,048474 \times \\ &\times [\xi_0(t-1)]^2 + 0,274591 \cdot [\xi_0(t-2)] \cdot [\xi_0(t-1)]. \end{aligned} \quad (22)$$

Коефіцієнт третього відбору  $k_3$ :

$$k_3 = N_3 / N_2 = 0,33. \quad (23)$$

Чотири змінні дозволяють знайти дві проміжні змінні такого рівня:

$$\begin{aligned} \xi_{5,6,11,12}(t) &= l_{0(5,6,11,12)} + l_{1(5,6,11,12)} \cdot [\xi_{5,6}(t)] + \\ &+ l_{2(5,6,11,12)} \cdot [\xi_{11,12}(t)] + l_{3(5,6,11,12)} \cdot [\xi_{5,6}(t)]^2 + \\ &+ l_{4(5,6,11,12)} \cdot [\xi_{11,12}(t)]^2 + l_{5(5,6,11,12)} \times \\ &\times [\xi_{5,6}(t)] \cdot [\xi_{11,12}(t)]; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \xi_{3,4,1,2}(t) &= l_{0(3,4,1,2)} + l_{1(3,4,1,2)} \cdot [\xi_{3,4}(t)] + \\ &+ l_{2(3,4,1,2)} \cdot [\xi_{1,2}(t)] + l_{3(3,4,1,2)} \cdot [\xi_{3,4}(t)]^2 + \\ &+ l_{4(3,4,1,2)} \cdot [\xi_{1,2}(t)]^2 + l_{5(3,4,1,2)} \cdot [\xi_{3,4}(t)] \cdot [\xi_{1,2}(t)] \end{aligned} \quad (25)$$

В результаті рішення одержимо такі вектори коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} \overline{L_{5,6,11,12}} &= \\ &= (0,916 \quad 0,368 \quad 0,832 \quad 0,015 \quad -0,092 \quad 0,068)^T; \\ \overline{L_{3,4,1,2}} &= \\ &= (0,606 \quad 0,376 \quad 1,158 \quad -0,0003 \quad 0,116 \quad -0,207)^T, \end{aligned} \quad (26)$$

або в явному вигляді рівняння запишуться так:

$$\begin{aligned} \xi_{5,6,11,12}(t) &= 0,916133 + 0,368383 \cdot [\xi_{5,6}(t)] + \\ &+ 0,832109 \cdot [\xi_{11,12}(t)] + 0,015496 \cdot [\xi_{5,6}(t)]^2 - \\ &- 0,09176 \cdot [\xi_{11,12}(t)]^2 + 0,068496 \times \\ &\times [\xi_{5,6}(t)] \cdot [\xi_{11,12}(t)]; \\ \xi_{3,4,1,2}(t) &= 0,0606337 + 0,376348 \cdot [\xi_{3,4}(t)] + \\ &+ 1,1578811 \cdot [\xi_{1,2}(t)] - 0,0003 \cdot [\xi_{3,4}(t)]^2 + \\ &+ 0,116027 \cdot [\xi_{1,2}(t)]^2 - 0,20743 \times \\ &\times [\xi_{3,4}(t)] \cdot [\xi_{1,2}(t)]. \end{aligned} \quad (27)$$

Коефіцієнти кореляції випадкової величини  $\xi(t)$  із проміжними змінними  $\xi_{5,6,11,12}(t)$ ,  $\xi_{3,4,1,2}(t)$  наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти кореляції проміжних змінних

Проміжні змінні	Коефіцієнти кореляції
$\xi_{5,6,11,12}(t)$	0,966706
$\xi_{3,4,1,2}(t)$	0,963991

Дві змінні дозволяють знайти кінцеве рівняння прогнозу випадкової складової:

$$\begin{aligned} \xi_{5,6,11,12,3,4,1,2}(t) &= l_{0(5,6,11,12,3,4,1,2)} + \\ &+ l_{1(5,6,11,12,3,4,1,2)} \cdot [\xi_{5,6,11,12}(t)] + \\ &+ l_{2(5,6,11,12,3,4,1,2)} \cdot [\xi_{3,4,1,2}(t)] + \\ &+ l_{3(5,6,11,12,3,4,1,2)} \cdot [\xi_{5,6,11,12}(t)]^2 + \\ &+ l_{4(5,6,11,12,3,4,1,2)} \cdot [\xi_{3,4,1,2}(t)]^2 + \\ &+ l_{5(5,6,11,12,3,4,1,2)} \cdot [\xi_{5,6,11,12}(t)] \cdot [\xi_{3,4,1,2}(t)]. \end{aligned} \quad (28)$$

В результаті рішення одержимо такий вектор коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} \overline{L_{5,6,11,12,3,4,1,2}} &= \\ &= (-1,412 \quad 0,914 \quad 0,071 \quad 0,115 \quad 0,095 \quad -0,209)^T. \end{aligned} \quad (29)$$

В явному вигляді рівняння передбачення запишеться таким чином:

$$\begin{aligned} \xi(t_{np}) &= -1,412 + 0,914 \cdot [\xi_{5,6,11,12}(t_{np})] + \\ &+ 0,071 \cdot [\xi_{3,4,1,2}(t_{np})] + 0,115 \times \\ &\times [\xi_{5,6,11,12}(t_{np})]^2 + 0,095 \cdot [\xi_{3,4,1,2}(t_{np})]^2 - \\ &- 0,209 \cdot [\xi_{5,6,11,12}(t_{np})] \cdot [\xi_{3,4,1,2}(t_{np})]. \end{aligned} \quad (30)$$

Прогнозні значення випадкової складової  $\xi(t_{np})$  корельовані із значеннями випадкової складової  $\xi(t)$  з коефіцієнтом кореляції рівним 0,979635. Значення випадкової складової і прогнозні значення випадкової складової за 2002-2013 роки приведені на рис. 12. З врахуванням систематичної, періодичної та випадкових складових у відповідності з виразом (1) зробимо прогноз можливої кількості НС природного характеру. Фактичні та прогнозні значення кількості НС природного характеру за 2002-2013 роки представлені на рис. 13 (ромб – реальні, квадрат – прогнозні значення).



Рис. 12. Значення випадкової складової і прогнозні її значення

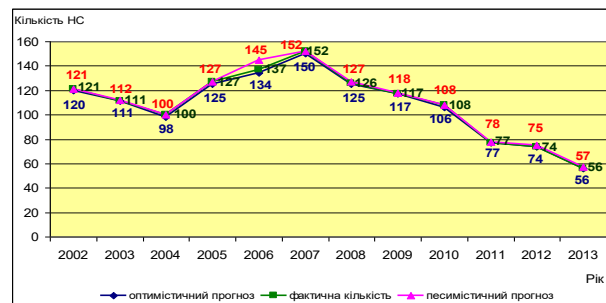


Рис. 13. Фактичні і прогнозні значення кількості надзвичайних ситуацій природного характеру

Таким чином, в 2013 році зафіксовано 56 НС природного характеру, а очікуване прогнозне значення складо: оптимістичний прогноз 56 НС, песимістичний прогноз 57 НС.

**3. Перевірка ефективності застосування методики прогнозування кількості надзвичайних ситуацій природного характеру.** На основі статистичних даних про НС в Україні [7, 8] проведені дослідження ефективності застосування методики прогнозування кількості НС природного характеру. В якості критерію ефективності виберемо модуль відносної помилки прогнозу, який розраховується на основі попередніх статистичних даних таким чином:

$$|\Delta| = \sum_{i=1}^n |\Delta_i| / n, \quad (31)$$

де  $|\Delta|$  – модуль середньої відносної похибки прогнозу;  $|\Delta_i|$  – модуль відносної похибки  $i$ -го кроку прогнозу;  $n$  – кількість статистичних даних.

Порівняльні дані прогнозних та фактичних значень кількості НС наведені в табл. 4. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що

застосування даної методики дозволяє здійснювати прогноз кількості НС в державі. При цьому середня відносна похибка прогнозу не перевищує 4,4 %. Слід зазначити, що при застосуванні статистико-ймовірного методу прогнозування кількості НС [20] середня відносна похибка прогнозу складала 8%.

Таблиця 4 -- Порівняння прогнозних та фактичних значень кількості НС за період 2013-2020 роки

Параметр		Рік							
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Кількість НС природного характеру	Фактична кількість	56	59	77	89	107	77	81	64
	Оптимістичний прогноз	55	53	72	84	102	76	77	62
	Песимістичний прогноз	57	60	79	93	108	80	84	66

Таким чином, за рахунок прогнозування випадкової складової процесу зміни НС природного характеру точність прогнозу кількості НС природного характеру збільшилась майже в 1,7 разів.

**4. Обговорення результатів експериментальних досліджень ефективності застосування методики прогнозування надзвичайних ситуацій природного характеру на основі методу попарного врахування аргументів.** З врахуванням дії всіх дестабілізуючих факторів процес зміни кількості НС природного характеру доцільно представити у вигляді адитивної суміші систематичної складової, яка характеризує незворотні процеси дрейфу параметрів, періодичної і випадкової складових. Оцінка всіх трьох складових процесу зміни НС природного характеру дозволить не тільки здійснити прогнозування по кожній із них, але й глибше проаналізувати причини виникнення подібних НС.

Розроблена методика дозволяє підвищити точність прогнозування НС природного характеру за рахунок прогнозування випадкової складової процесу зміни природних НС на основі методу МПВА. Результати експериментальних досліджень показали, що застосування даної методики дозволяє здійснювати прогноз кількості НС з середньою відносною похибкою прогнозу 4,4 %. Це майже в 1,7 рази перевищує точність прогнозу при застосуванні статистико-ймовірного методу прогнозування кількості НС природного характеру. Деякі складності і обмеження дослідження ефективності застосування методики можуть бути викликані недостатнім обсягом або некоректністю достовірних статистичних даних про НС природного характеру в державі.

Подальший розвиток запропонованої методики повинен бути спрямованим на дослідження впливу різноманітних дестабілізуючих факторів як окремо, так і в їх сукупності, на процеси виникнення та розвитку НС природного характеру в різних регіонах держави.

## Висновки

1. Обґрунтовано вибір моделі зміни узагальненого параметру процесу зміни НС природного характеру. В якості узагальненого параметру розглядається кількість НС за деякий проміжок часу (наприклад, за рік). Із врахуванням дії всіх дестабілізуючих факторів цей процес доцільно представити у вигляді адитивної суміші систематичної складової, яка характеризує незворотні процеси дрейфу параметрів, періодичної і випадкової складових. Оцінка всіх трьох складових процесу зміни НС природного характеру дозволить не тільки здійснити прогнозування по кожній із них, але й глибше проаналізувати причини виникнення НС.

2. Розроблена методика підвищення точності прогнозування НС природного характеру на основі МПВА. Методика дозволяє підвищити точність прогнозування НС природного характеру за рахунок оцінки систематичної та періодичної складових, а також прогнозування випадкової складової процесу зміни природних НС на основі методу МПВА. Це здійснюється за рахунок рекурентного вирішення кількох систем нормальних рівнянь, складених для кожної пари аргументів і для нових допоміжних змінних.

3. Перевірка ефективності застосування методики показали, що вона дозволяє підвищити точність прогнозування НС природного характеру за рахунок прогнозування випадкової складової процесу зміни природних НС на основі методу МПВА. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що середня відносна похибка прогнозу становить близько 4,4 %. Це майже в 1,7 рази перевищує точність прогнозу при застосуванні статистико-ймовірного методу прогнозування кількості НС природного характеру.

Ефективність застосування методики буде залежати від достовірності та обсягу статистичних даних про НС природного характеру за деякий період моніторингу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tiutiunyk, V.V., Ivanets, H.V., Tolkunov, I.A., Stetsyuk, E.I. (2018). System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. Scientific Bulletin of National Mining University, 1(1(163)), 99-105. 10.29202/nvngu/2018-1/7.
2. Wang-Kun Chen. (2012). Managing emergency response of air pollution by the expert system // Air pollution – a comprehensive perspective. P. 319-336. doi: 10.5772/50080.
3. Guskova, N.D., Neretina, E.A. (2013). Threats of natural character, factors affecting sustainable development of territories and their prevention. Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA, 63(3), 227-237. <https://doi.org/10.2298/ijgi1303227g>.
4. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10 (90)), 11–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114504>.

5. Rybalova, O., Artemiev, S., Sarapina, M., Tsybmal, B., Bakhareva, A., Shestopalov, O., Filenko, O. (2018). Development of methods for estimating the environmental risk of degradation of the surface water state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (92)), 4–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127829>.
6. Bakhareva, A., Shestopalov, O., Filenko, O., Tykhomyrova, T., Rybalova, O., Artemiev, S., Bryhada, O. (2018). Studying the influence of design and operation mode parameters on efficiency of the systems of biochemical purification of emissions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10(93)), 59–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133316>.
7. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2019 році. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: URL: [http://www.dsns.gov.ua/files/2020/1/26/Zvit%202019\(KMU\).pdf](http://www.dsns.gov.ua/files/2020/1/26/Zvit%202019(KMU).pdf).
8. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2020 році. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: URL: [http://www.dsns.gov.ua/files/2021/1/26/Zvit%202020\(KMU\).pdf](http://www.dsns.gov.ua/files/2021/1/26/Zvit%202020(KMU).pdf).
9. Іванець Г.В. Аналіз стану техногенної, природної та соціальної небезпеки адміністративно-територіальних одиниць України на основі даних моніторингу. /Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. –Х. Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016. – Вип. 3 (48). – 218с., С.142-145
10. Іванець Г.В., Толкунов І.О., Стецюк Є.І. Модель процесу зміни узагальнених параметрів надзвичайних ситуацій природного характеру. / Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. пр. – Харків: НУЦЗУ, 2016. – Вип. 23.-211с., с. 46-52
11. Deng, S. C., Wu, Q., Shi, B., Chen, X. Q., Chu, X. M. (2014). Prediction of Resource for Responding Waterway Transportation Emergency Based on Case-Based Reasoning. *China Safety Science Journal*, 24(3), 79–84.
12. Vasiliev, M. I., Movchan, I. O., Koval, O. M. (2014). Diminishing of ecological risk via optimization of fire-extinguishing system projects in timber-yards. *Scientific Bulletin of National mining university*, 5, 106–113. Available at: <http://www.nvngu.in.ua/index.php/en/home/985-engcat/archive/2014/contents-no-5-2014/environmental-safety-labour-protection/2797-diminishing-of-ecological-risk-via-optimization-of-fire-extinguishing-system-projects-in-timber-yards>.
13. Sun, B. Z., Ma, W. M., Zhao, H. Y. (2013). A Fuzzy Rough Set Approach to Emergency Material Demand Prediction over Two Universes. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 7062–7070. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.008>.
14. Mygalenko, K., Nuyanzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10(91)), 31–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121727>.
15. Kryanev, A., Ivanov, V., Romanova, A., Sevastianov, L., Udumyan, D. (2018). Extrapolation of Functions of Many Variables by Means of Metric Analysis. *EPJ Web of Conferences*. 173, 03014. Available at: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817303014>.
16. Evangelidou, N., Balkanski, Y., Cozic, A. et al. (2015). Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus: future risks for the population and the environment. *Ecological Monographs*, 85(1), 49–72. Available at: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/14-1227.1>.
17. Al-Jumeily D., Ghazali R., Hussain A. Predicting physical time series using dynamic ridge polynomial neural networks. // *PLoS ONE*. 2014, №9: e105766. doi: 10.1371/journal.pone.0105766.
18. Emergency flood bulletins for Cyclones Idai and Kenneth: A critical evaluation of the use of global flood forecasts for international humanitarian preparedness and response / Rebecca E., Hannah C., Andrea F et al.// *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. V.50.101811. Doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101811.
19. Іванець Г.В., Стецюк Є.І., Толкунов І.О. Методика оцінки періоду періодичної складової випадкового процесу зміни узагальненого параметру надзвичайних ситуацій природного характеру / Г.В. Іванець, Є.І. Стецюк, І.О. Толкунов // Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. пр. – Харків: НУЦЗУ, 2015. – Вип. 22. – С.46-53.
20. Ivanets, H., Horielyshev, S., Ivanets, M., Baulin, D., Tolkunov, I., Gleizer, N., Nakonechnyi, A. (2018). Development of combined method for predicting the process of the occurrence of emergencies of natural character. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10(95)), 48-55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143045>.

Received (Надійшла) 11.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.03.2022

#### Methods of improving the accuracy of forecasting of emergency emergency situations on the basis of the method of couply accounting of arguments

H. Ivanets, M. Ivanets, I. Tolkunov, I. Popov

**Abstract.** The effectiveness of planning and implementation of measures to prevent emergencies of a natural nature is determined by the quality of forecasting the threats of their occurrence. Emergency prevention is based on the analysis and accuracy of forecasting the possibility of such emergencies. The article substantiates the choice of the model of change of the generalized parameter of the process of change of emergencies of natural character. The number of emergencies over a period of time is considered as a generalized parameter. Taking into account the action of all destabilizing factors, this process should be presented in the form of an additive mixture of systematic components, which characterizes the irreversible processes of drift parameters, periodic and random components. Assessment of all three components of the process of changing natural emergencies will allow not only to make predictions on each of them, but also to analyze more deeply the causes of emergencies. A method for improving the accuracy of forecasting emergencies of a natural nature based on the method of pairwise consideration of arguments. The method allows to increase the accuracy of forecasting emergencies of natural nature by assessing the systematic and periodic components, as well as forecasting the random component of the process of changing natural emergencies. Experimental studies have shown the effectiveness of the method of pairwise consideration of arguments to predict the random component of the process of emergencies of a natural nature on the basis of the developed methodology. At the same time, the accuracy of forecasting the number of emergencies compared to the statistically probable forecast method has increased almost 1.7 times. This allows reasonable approaches to the planning and implementation of organizational and technical measures aimed at preventing and eliminating the consequences of emergencies both in the state and its regions.

**Keywords:** emergency situation, generalized parameter, systematic component, periodic component, random component, model, method of pairwise consideration of arguments.



А. В. Ковальова

Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

## ОЦІНКА І КЛАСИФІКАЦІЯ ВИРОБНИЧОГО РИЗИКУ ПРИ ВИКОНАННІ ДОРОЖНІХ РОБІТ НА ПРИКЛАДІ МІСТА КИЄВА

**Анотація.** В роботі визначається комплексний виробничий ризик за допомогою системної моделі для працюючих на відкритому повітрі при реконструкції автотранспортних шляхопроводів з урахуванням метеорологічних факторів, забруднення атмосферного повітря та хронічного впливу шуму від автотранспортних засобів. **Запропоновано** методологію системного підходу до визначення професійного ризику на основі ієрархічної дворівневої системної математичної моделі, яка враховує всі закономірності впливу основних небезпечних факторів. Запропоновано кваліфікаційну шкалу для оцінки виробничого ризику для здоров'я працюючих. **Визначено**, що значення ризику для здоров'я працюючих при виконанні дорожніх робіт не може бути отримано на основі існуючих нормативних документів, оскільки вони не враховують ризик від постійного шумового навантаження від автотранспортних засобів на шляхопроводах, що додатково посилюється температурним впливом в теплі місяці року. **Розроблена** системна математична модель оцінки та класифікації значення виробничого ризику для працюючих на відкритому повітрі, яка враховує всі закономірності впливу основних небезпечних факторів забруднення міського середовища та проведено її апробацію для умов м. Києва. **Результати роботи актуальні** для удосконалення управління безпекою працюючих при виконанні дорожніх робіт за рахунок комплексного врахування всіх шкідливих факторів впливу при оцінці виробничого ризику.

**Ключові слова:** виробничий ризик, автомобільні шляхопроводи, системна модель, індекс теплового навантаження, вплив шумового забруднення, речовинне забруднення атмосферного повітря.

### Вступ

Визначення виробничого ризику для працюючих на відкритому повітрі і його відповідність значень існуючим нормативам слід розглядати комплексно від всіх впливових факторів і цьому питанню останнім часом присвячено багато досліджень.

Окремі дослідження стосуються підвищенню температурних показників в теплі періоди року та взаємозв'язку забруднення атмосферного повітря в умовах глобальних кліматичних змін та здоров'ям населення біля автотранспортних шляхопроводів урбанізованих територій [1-4]. В даних роботах розглядається питання вторинних утворень токсичних забруднювачів в атмосферному повітрі від викидів автотранспортних засобів, які працюють на бензиновому та дизельному паливі.

Питання впливу підвищення індексу забруднення повітря зваженими аерозольними частками PM<sub>2,5</sub> внаслідок підвищення температурних умов та вологості повітря в літні спекотні місяці року на значення ризику для здоров'я населення розглянуто в роботі [5].

Доведено, що тверді частки діаметром менш як 2,5 мкм в атмосфері міста є значним предиктором кількості підтверджених випадків багатьох захворювань, в т.ч. на COVID-19.

На безпеку працюючих автодорожніх служб значно впливає постійне шумове навантаження. Ознаки порушень здоров'я людей, які проживають або знаходяться тривалого часу від впливом транспортного шуму та оцінку подразнюючої дії шуму за допомогою соціологічних та соціально-акустичних обстежень класифіковані авторами робіт [6-9].

Коди порушення здоров'я визначалися при цьому згідно МКХ-10 (ICD – 10), що за розробкою

Всесвітньої організації охорони здоров'я є загальноприйнятою класифікацією для кодування медичних захворювань.

Так, у населення, яке має хронічний вплив шумового навантаження навколишнього середовища спостерігається:

- порушення нервової системи (нервова напруга і роздратування, порушення сну, когнітивні порушення, вегето-судинна дистонія), коди МКХ – R45.0, G47, R41, G90.8 відповідно;
- порушення системи кровообігу (підвищення кров'яного тиску, неспецифічне, без діагнозу гіпертензії, гіпертезивна хвороба серця, ішемічна хвороба серця, стенокардія, інфаркт міокарда), коди МКХ – R03.0, I11.9, I24, I25, I20, I21 відповідно;
- вушні хвороби (шум у вухах, суб'єктивний, кондуктивна і нейросенсорна втрата чутності, втрата чутності, що викликана шумом), коди МКХ – H93.1, H90, H83.3 відповідно.

Результати представлених в роботах досліджень знайшли своє втілення в ряд нормативних документів, в т.ч. міжнародних [10-12 та ін.].

Працівники по ремонту автошляхопроводів та масштабної розбудови інфраструктури на урбанізованих територіях знаходяться протягом 8-годинного робочого дня під впливом даних небезпечних факторів, тому визначення засобів захисту для гарантування їх безпечної праці є вкрай актуальним, особливо з врахуванням реалізації в даний час Проекту «Велике будівництво» в містах України.

Питання, яке має бути також розглянуто – чи знаходиться в існуючих межах нормативне значення виробничого ризику для працюючих на відкритому повітрі біля великих перехрестів та шляхопроводів.

**Аналіз останніх досліджень.** Значення виробничого ризику працюючих на відкритому повітрі

даної категорії в нормативних документах та наукових дослідженнях визначається окремо по кожному впливовому фактору.

Слід зазначити, що навіть при такому підході останніми роками спостерігається певне перевищення значень ризику.

Так, за стандартними методиками щодо визначення професійного ризику в залежності від роботи в умовах літніх значень температурних показників спостерігаються допустимі мікрокліматичні умови на стан праці, на відміну від оптимальних, згідно нормативного документу [13].

Вплив забруднення атмосферного повітря на значення ризику розглядається дослідниками, зазвичай, у взаємозв'язку з кліматичними умовами.

Так в роботі [14] було проведено математичне моделювання щодо значень дані канцерогенного та неканцерогенного ризиків для здоров'я від вторинного забруднення атмосфери викидами автомобільного транспорту в умовах сталості атмосфери. Розраховане перевищення значень ризику для здоров'я населення в цих дослідженнях для умов м. Києва склало 3-4 рази.

Дана методика може бути також застосована для працюючих автодорожньої галузі в частині хронічного впливу токсикантів внаслідок фотохімічних реакцій в атмосферному повітрі урбанізованих територій в залежності від температури, вологості та швидкості повітря на даній місцевості.

Питанню взаємозв'язку температурних умов та забруднення атмосферного повітря присвячені також роботи [15, 16], в яких на основі експериментальних та теоретичних досліджень доведено тенденцію підвищення значень виробничого ризику в умовах глобальних кліматичних змін.

Один з основних факторів впливу на безпеку працюючих - перевищення нормативного рівня шумового забруднення біля великих автомобільних розв'язок та шляхопроводів, що останнім часом спостерігається повсюдно в великих містах світу. Значення перевищень над нормативним рівнем по окремих точках фіксується як в окремих дослідженнях, так і в даних шумових карт по великих мегаполісах світу.

Так згідно даних U.S.Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics, (середньозважений рівень шуму біля автотранспортних шляхопроводів протягом 2016-2018 років становив 80-89,9 дБА, що склало 3,4% перевищення нормативного значення для здоров'я населення, що перебуває в зоні дії шумового опромінення [17].

За даними джерела [18] в м. Москва рівень шумового опромінення біля авторозв'язок становить по середньодобовому значенні 79-80дБА, але за максимальним значенням вимірів (90-92дБА) відсоток перевищення нормативного значення становить 9,4%.

Побудована нещодавно шумова карта м. Пекін (Китай) зі шкалою шумового забруднення від 35дБ до 85дБ, біля основних автошляхопроводів має значення від 70 до 75 дБА [19].

Що стосується шумового рівня в містах України, то його рівень останніми роками поблизу вели-

ких автошляхопроводів зростає відповідно до зростання кількості автомобільного транспорту на дорогах.

Дослідження, які були проведені в 2017 році на центральних вулицях в м. Запоріжжя зафіксували відсоток перевищення шумового забруднення відносно нормативного рівня на 3,4% (88дБА) [20].

Аналіз зроблений в документі WHO [21] свідчить про те, що переважна більшість країн і відповідних регулюючих світових установ приймають 8-годинну зважену за часом межу опромінення для професійного шуму 85 дБА використовуючи швидкість обміну з інтенсивністю часу 3 дБ.

Щоб повністю виключити ризик будь-якої вимірної втрати слуху, викликаній шумом, у будь-якої людини, яка піддається впливу на аудіометричних частотах 0,5-6 кГц, був встановлений ліміт опромінення, що дорівнює 24-годинному еквіваленту безперервного рівня опромінення (LEQ) у 70дБА з інтенсивністю обміну часу 3 дБ.

Даний рівень має еквівалент 8-годинній експозиції LEQ 75дБА, але за умови середнього рівня шуму за решту годин доби, що не перевищує 60 дБА. При цьому зазначається, що 24-годинний LEQ ліміт 75 дБА призводить до надмірного ризику істотного погіршення слуху протягом 40 років менше ніж на 1% (тобто < 1 з 100 працівників впливу шумового опромінення на цьому рівні).

В International Standard ISO 1999:2013(E) зазначено, що загальноприйняту методику розрахунку порогу чутності від постійного шумового навантаження можна застосовувати також для працюючих на відкритому повітрі з врахуванням віку та професійного стажу [22].

Документ розроблений на основі аналізу статистичних даних та його застосування має імовірний характер. На основі когортних досліджень у відібраних групах осіб, встановлюється абсолютний, додатковий (атрибутивний) і відносний ризику від впливу шумового забруднення від автомобільного транспорту при перебуванні працюючих протягом 8-годинного робочого дня.

В більшості європейських країн використовується на даний час Директива 2003/10/EC (2003), що визначає професійний ризик та встановлює ліміти для щоденних (протягом 8-годинного робочого дня) або щотижневих (тобто еквівалентний безперервний середній рівень шуму(дБА), що виміряний з використанням обмінного курсу 3 дБ і нормований на 8-годинний період впливу (LEX) протягом п'яти робочих днів протягом одного робочого тижня) меж опромінення для працюючих.

Цей нормативний документ не визначає ризик погіршення слуху щодо даних обмежень, однак, як і обмеження ACGIH і NIOSH, визначає пік меж впливу [23].

Прийнятими та застосованими для визначення виробничого ризику для працівників автодорожньої галузі є міжнародні нормативні документи [24-26]. В даних документах оцінку агрегованого ризику порушень серцево-судинної, нервової системи та органів слуху пропонується виконувати на основі рішення

системи рекурентних рівнянь, яка заснована на еволюційних математичних моделях розвитку впливу шумового опромінення, які засновані на динаміці спостережень цих ефектів на фоні природного старіння організму.

Аналіз літературних джерел щодо значення виробничого ризику для працюючих на відкритому повітрі дозволяє констатувати, що на сьогоднішній день сукупний вплив всіх факторів на його значення залишається недостатньо вивченим.

**Мета досліджень.** Визначення комплексного виробничого ризику за допомогою системної моделі для працюючих на відкритому повітрі при реконструкції автотранспортних шляхопроводів з урахуванням метеорологічних факторів, забруднення атмосферного повітря та хронічного впливу шуму від автотранспортних засобів

### Виклад основного матеріалу

Методи, що використовувалися в роботі включали методи обробки даних моніторингових досліджень за забрудненням атмосферного повітря та кліматичних даних місцевості.

Натурні дослідження для вимірювання шумового та забруднення для умов м. Києва були здійснені колиброваним шумоміром «Асистент».

Значення виробничого ризику для безпеки працюючих за різними небезпечними впливовими факторами визначалося за діючими національними та міжнародними нормативними документами [13, 26, 27].

Системну модель оцінки та класифікації виробничого ризику для даної категорії працюючих побудовано на основі комплексного синергетичного підходу, що є ієрархічною дворівневою і передбачає виконання двох основних операцій: формування множини альтернатив факторів впливу та порівняння,

вибір варіантів впливу на значення виробничого ризику.

На першому рівні ієрархії запропонована модель містить три самостійні підсистеми, що включають:

вплив метеорологічних показників атмосферного повітря (перша підсистема), значення шумового впливу (друга підсистема), хронічний вплив на працюючих перевищення показників забруднення повітря (третя підсистема).

Системна модель передбачає реалізацію аналізу та оцінку окремих процесів, елементів у підсистемах. Кожна підсистема характеризується своїм набором критеріїв та показників  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ ;  $g_1, g_2, g_3, \dots, g_4$ ;  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ .

При реалізації першої підсистеми ієрархічної моделі можна використовувати ТНС-індекс (індекс теплового навантаження на навколишнє середовище) щодо інтегральної оцінки теплового навантаження середовища на робочих місцях для відкритих територій у теплу пору року.

Зазвичай індекс ТНС визначається за допомогою експертної оцінки.

Але при умовах попередньої оцінки виробничого ризику для працюючих з метою прийняття управлінських рішень на рівні організації можна скористатися величиною відносного відхилення від оптимальних значень температури, вологості та швидкості вітру.

За умов визначеного класу умов праці (III) та загальних енерговитрат більше 290 Вт, виділяємо такі класи ризиків згідно табл. 1. Значення виробничого ризику від сукупної дії шумового забруднення від автотранспортних засобів, які перебувають в цей час на автошляхопроводі визначається згідно нормативному документу [25].

Таблиця 1 – Категорія виробничого ризику в залежності від класу умов праці

Категорія професійного ризику	Клас умов праці згідно «Гігієнічної класифікації» [14]	Індекс ТНС для категорії робіт на відкритому майданчику для III категорії робіт
19,0-1 Низький (I)	Оптимальні умови праці	17,0 - 18,9
Допустимий(II)	Допустимі умови праці	19,0 - 21,8
Значний (III)	Шкідливі умови праці	21,9 – 27,9
Небезпечний (VI)	Небезпечні, екстремальні умови праці	Більше 27,9

На прикладі окремих показників забруднення атмосферного повітря урбанізованих територій за даними окремих стаціонарних постів спостережень в м. Києві та побудованих залежностей між основними компонентами забруднення та середньомісячними температурними умовами в м. Києві за даними спостережень Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б.Срезневського в розрізі 2013-2020 років спостережень, розроблена шкала класифікацій між кількісними показниками виробничого ризику та показниками забруднення атмосферного повітря.

Класи ризиків від забруднення атмосферного повітря представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Класи ризиків від забруднення атмосферного повітря

Категорія виробничого ризику	Межі виробничого ризику	Клас показників виробничого ризику
низький	< 1,0	I
допустимий (середній)	1,0-0	II
значний	10 - 100	III
небезпечний	>100	IV

Координуючий алгоритм прийняття рішень по всім підсистемам враховує значення виробничого ризику згідно формули

$$R' = \sum a_i \cdot R_i, \quad (1)$$

де  $i = 1, 2, 3$ , а значення  $R'$  і  $R_i$  відповідно значення унітарного виробничого ризику від всіх впливових факторів на безпеку працюючих і значення виробничого ризику по кожному з блоку показників;  $a_i$  – ваговий коефіцієнт впливу кожного фактору, що розглядається.

Значення вагових коефіцієнтів впливу від окремих факторів зовнішнього середовища при формуванні комплексного виробничого ризику визначалася на основі кореляційних залежностей між такими факторами на виробничому майданчику як температура атмосферного повітря, швидкість вітру та вологість повітря, шумове забруднення виробничого майданчика та хімічний вплив забруднення повітря.

Матриця ранжування включає роки аналізу статистичних спостережень та в якості критеріїв прийнято квадрат похибки поліноміальної залежності:

$$R' = f(X_1, X_2, X_3) \quad (2)$$

Вагові коефіцієнти визначалися згідно формули:

$$\lambda_i = r_i / \sum r_i$$

де  $i = 1, 2, 3$ ;

$$\sum R^2(X_1) = r_1, \sum R^2(X_2) = r_2, \sum R^2(X_3) = r_3. \quad (3)$$

Отримані вагові коефіцієнти основних факторів, які впливають на формування виробничого

ризик при інших рівних умовах для м. Києва дорівнюють відповідно:

$\lambda_1 = 0,36$  (метеофактори навколишнього середовища – температура, вологість, швидкість повітря);

$\lambda_2 = 0,2$  (постійне шумове забруднення від автотранспортних засобів);

$\lambda_3 = 0,44$  (забруднення атмосферного повітря).

Підсумкова класифікація виробничого ризику для працюючих на відкритому повітрі представлена в табл. 3.

Значення загального сукупного виробничого ризику, що було розраховано за запропонованою в роботі методикою представлено для двох рівнів шумового навантаження – середньо вимірних значень та максимальних вимірів для працюючих на відкритому повітрі 50-річних з 30-літнім професійним стажем.

Значення виробничого ризику в межах окремих підсистем для умов м. Києва представлено на діаграмі на рис. 1 – 3.

Рівень виробничого ризику за окремими напрямками впливу на здоров'я працюючого від шумового навантаження (ризик захворювання органів слуху, ризик захворювання серцево-судинної системи, ризик захворювання нервової системи) знаходяться в межах низького ( $R < 0,05$ ) та помірного ( $0,35 > R > 0,05$ ).

Але що стосується значення сукупного агрегованого ризику, то його значення незалежно від віку працюючого знаходиться в межах середнього (помірного) ризику, а у випадку працюючих за віком більше 50 років ризик кваліфікується, як високий.

Таблиця 3 – Класифікація сукупного виробничого ризику для категорії працюючих на відкритому повітрі

Категорії виробничого ризику	Значення ризику	Характеристика ризику
Низький	1,0 - 1,5	Не потребує проведення заходів по зниженню професійного ризику
Допустимий	1,6 - 2,0	Проведення заходів по захисту уразливих осіб
Шкідливий, в залежності від категорії умов праці	2,1 - 3,0	Потрібні заходи зі зниження ризику та встановлення термінів з їх зниження ( від визначених термінів до негайного зниження)
Небезпечний	3,1 - 4,0	Роботи проводяться за спеціальним регламентом

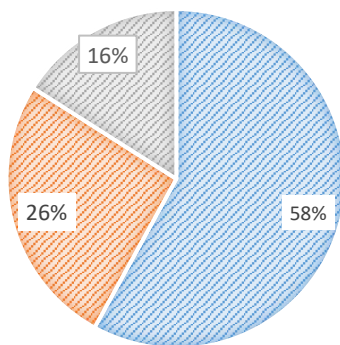


Рис. 1. Значень виробничого ризику в залежностях від ТНС-індексу на шляхопроводах м. Києва.  
58% - низький ризик; 26% - значний ризик;  
16% - допустимий ризик;

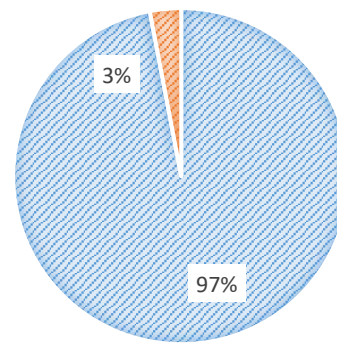
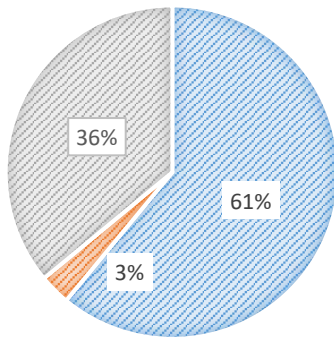


Рис. 2. Середнє значення розрахунку шумового забруднення;  
97% - шкідливий;  
3% - допустимий



**Рис. 3.** Розподіл для максимальних перехрестів та максимальних значеннях. 61% - небезпечний; 36% - шкідливий; 3% - помірний

Але що стосується значення сукупного агрегованого ризику, то його значення незалежно від віку працюючого знаходиться в межах середнього (помірного) ризику, а у випадку працюючих за віком більше 50 років ризик кваліфікується, як високий.

В даному випадку рекомендовано застосування заходів для організації постійного моніторингу шумового забруднення; заходи по зниженню шумового навантаження слід розробляти з врахуванням середньострокової та короткострокової перспективи (1-3 роки), а також щорічний перегляд значень виробничого ризику.

Що стосується третьої підсистеми щодо впливу забуднення атмосферного повітря на виробничий ризик, то її аналіз слід розглядати в розрізі конкретного місяця, оскільки значення ризику безпосередньо пов'язано із температурними факторами місцевості при сталих метеоумовах і певному значенні вологості. Статистична залежність між показниками вологості і температури при цьому має коефіцієнт кореляції, який дорівнює 0,9. Згідно проведених розрахунків, можна бачити, що для трьох самих спекотних місяців 2020 року виробничий ризик кваліфікувався як шкідливий. Значення вторинних забруднювачів (ми для прикладу розглядали неканцерогенний ризик від формальдегіду, як основного токсичного забруднювача повітря від автотранспортних засобів внаслідок фотохімічних перетворень в повітрі) перевищувало в ці місяці гранично допустимі концентрації в повітрі до 5-6 разів.

Згідно даних розрахунку можна зробити висновок, що для всіх великих автомобільних перехрестів в м. Києві, не спостерігається низького значення професійного ризику для працюючих по ремонту автошляхопроводів. Для всіх автошляхопроводів в місті, крім

розв'язки Проспект Перемоги - М. Василенко (м. Берестейська) при умові прийняття в розрахунках середнього значення вимірюного (або розрахованого) значення постійного шумового навантаження від автотранспортних засобів спостерігається допустимий (середній) рівень виробничого ризику для цієї категорії працюючих (в межах 1,6-2,0) та потребує від роботодавця проведення заходів по захисту уразливих осіб.

Що стосується максимальних вимірів постійного шумового навантаження, то на таких розв'язках, як:

вул. Богатирська - вул. Лугова - проспект Маршала Тимошенка,

вул. Електротехнічна - вул. Братиславська, вул. Щербаківського - вул. Стеценка; - вул. Маршала Гречка, вул. Шусева - вул. ОлениТеліги; - вул. Мельникова, проспект Броварський - вул. Братиславська (м. Чернігівська),

проспект Перемоги (м. Святошин), Бульвар Дружби Народів - Наддніпрянське шосе

та інших (всього 63 %) виробничий ризик знаходиться в межах допустимого. На 37% автомобільних перехрестях, які розглядалися в даному розділі, виробничий ризик кваліфікувався, як шкідливий зі значеннями в межах 2,1 – 3,0. Таке значення ризику потребує від роботодавця застосування заходів зі зниження ризику та встановлення термінів з їх зниження.

### Висновки

В даній статті представлено розроблену авторами методологію оцінки та прогнозування прийнятності виробничого ризику для працівників, що працюють на відкритому повітрі на урбанізованих територіях на основі системного підходу. При побудові моделі використовувався підхід який передбачає врахування всіх впливових факторів в умовах глобальних кліматичних змін. Модель складається з двох рівнів ієрархії та апробована прикладі великих автотранспортних розв'язок м. Києва для даних 2020 року, як одного з самих спекотних років за всю історію спостережень в місті. Проведені дослідження показали необхідність при визначенні виробничого ризику при виконанні дорожніх робіт врахування шумового забруднення від автотранспортних засобів на автошляхопроводі, хімічного забруднення повітря від викидів автотранспорту, підвищених температур в спекотні місяці року. Отримані результати дозволять удосконалити систему управління виробничими ризиками в питаннях проектування, будівництва та реконструкції урбанізованих територій та коректно визначати заходи щодо безпеки працівників.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Liao, T., Jiang, W., Ouyang, Z. et al. (2021). Evaluation of the health risk of air pollution in major Chinese cities using a risk-based, multi-pollutant air quality health index during 2014–2018. *Air Qual Atmos Health*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01042-6>.
- Polishchuk S, Dotsenko L., Demidenko A. Estimation of the influence of meteorological factors on the state of atmospheric air pollution in the city of Dnipropetrovsk (on the example of formaldehyde). *Construction, materials science, machine building: Starodubsky Readings*, С. 266-270. 2015.
- Сіпаков Р., Волошка О., Березницька Ю., Клімова І. (2018). Оцінка ризику для здоров'я населення від викидів автомобільного транспорту у м. Києві. *Науково-технічний журнал «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування»*, №1(17), С. 14-20.

4. Conticini E., Frediani B., Caro D. Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? *Environmental Pollution*, Volume 261p. 2020 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114465>.
5. Haralabidis A., Dimakopoulou K., Vigna-Taglianti F., Giampaolo M., Borgini A., Dudley M.-L., Pershagen G., Bluhm G., Houthuijs D., Babisch W., Velonakis M., Katsouyanni K., Jarap L. Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports. *European Heart Journal*, 2008 DOI: <https://kod-zdorovia.com.ua/article/29.html>.
6. Prasher, *Environmental Noise and Health: The Latest Evidence – 2002* DOI: <https://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2009;volume=11;issue=44;spage=151;epage=155;aulast=Prasher>
7. Haines M., Brentnall S., Stansfeld S., Klineberg E. Qualitative responses of children to environmental noise. *Noise & Health*, vol. 5, № 19, 19-30. 2003
8. Фридман К., Лим Т., Шусталов С. Концептуальная модель оценки и управления риском здоровью населения от транспортных загрязнений Гигиена и санитария. № 3. 20 - 25. 2021
9. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise - Declaration by the Commission in the Conciliation Committee on the Directive relating to the assessment and management of environmental noise DOI: <https://inlnk.ru/9P447k>
10. Planning Policy Guidance 24: Planning and Noise (PPG 24). London, 3. DOI: <https://inlnk.ru/BpBBN1> 1994.
11. ГОСТ Р ИСО 1999-2017 «Акустика. Оценка потери слуха вследствие позднейшего шума», (2018) DOI: <https://docs.cntd.ru/document/1200157242?marker=7E20KD>
12. ГН 3.3.5-8-6.6.1. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу (ГН 3.3.5-8-6.6.1 2002.), затверджено Наказом МОЗ України №528 (2001)
13. Sipakov R., Voloshkina O., Varavin D., Ampilova Y., Krivomaz T., Berezniiska J. Pollution of atmospheric air above the city highways. *Journal*, vol. 2, no. 4, 01–08. 2018.
14. Ковальова А., Кравченко М., Клімова І. Вплив підвищеної температури та забруднення атмосферного повітря міського середовища внаслідок кліматичних змін на здоров'я працівників соціальної. Вісник придніпровської державної академії будівництва і архітектури №2 (271-272). С.104-110. 2020.
15. Sciencewicki J. et al. Air Pollution and Respiratory Viral Infection. *Inhalation Toxicology* 19(14). P. 1135-1146. 2007.
16. 17.U.S.Department of Transportation. Bureau of Transportation Statistics. National Transport Noise Map 2020. DOI: <https://www.bts.gov/newsroom/under-quarter-population-exposed-office-type-transportation-noise>.
17. Семутникова Е. Шум мегаполиса. «ЭКО-Журнал». 2009. Веб-сайт.URL: [https://mosecom.mos.ru/wp-content/uploads/2018/02/City\\_noise.pdf](https://mosecom.mos.ru/wp-content/uploads/2018/02/City_noise.pdf)
18. Первая карта шума Пекина похожа на абстрактную картину. Газета "ЖЭНЬМИНЬ ЖИБАО" (2009) Воспроизведено с <http://russian.people.com.cn/31516/6765727.html>
19. 20 Kuris, O., Matyashcheva, K., Bielokon, G. Kozhemyakin Y. (2017) The research of motor transport influence on city noises safety of stable urbanized territories development. *Безпека життєдіяльності*. P. 183-188.
20. Neitzel R., Fligor B. (2017). Determination of risk of noise-induced hearing loss due to recreational sound: review WHO, 25. [https://www.who.int/pbd/deafness/Monograph\\_on\\_determination\\_of\\_risk\\_of\\_HL\\_due\\_to\\_exposure\\_to\\_recreational\\_sounds.pdf](https://www.who.int/pbd/deafness/Monograph_on_determination_of_risk_of_HL_due_to_exposure_to_recreational_sounds.pdf)
21. International Standart ISO 1999:2013(E) Acoustics — Estimation of noise-induced hearing loss. DOI: <https://www.iso.org/ru/standard/45103.html>
22. Директива 2003/10/EC – Шум (2006). Веб-сайт. URL: <https://www.cejn.com/guides-support/standards--legislations/safety-standards/directive-200310ec---noise/>
23. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise - Declaration by the Commission in the Conciliation Committee on the Directive relating to the assessment and management of environmental noise.
24. Planning Policy Guidance 24: Planning and Noise (PPG 24). London, 3 (1994).
25. Онищенко Г., Аксенова О, Гуськов А., Черненко С. (2012). Методические рекомендации МР 2.1.10.0059-12. Оценка риска для здоровья населения от воздействия транспортного шума, Москва, 40.
26. Методичні рекомендації «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря», затверджено Наказом МОЗ України 13.04.2007 №184, К.- 40с.
27. О.С.Волошкіна, А.В. Ковальова, Системи управління, навігації та зв'язку: фах. журн. / засн. Національний університет Полтавська політехніка ім.Ю.Кондратюка. Полтава, 2021 – щоквартальне видання –3(65) С 118-122.

Received (Надійшла) 23.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.03.2022

#### Assessment and classification of occupational risk for safety of workers during the reconstruction of roads on the example of Kyiv

A. Kovalova

**Abstract.** The paper identifies a complex production risk using a system model for outdoor workers air pollution and chronic noise from vehicles. The methodology of the system approach to definition of professional risk on the basis of hierarchical two-level system mathematical model which considers all laws of influence of the basic dangerous factors is offered. A qualification scale has been proposed to assess occupational risk to the health of workers. It is determined that the value of risk to the health of workers when performing road works can not be obtained on the basis of existing regulations, take into account the risk of constant noise load from vehicles on overpasses, which is further exacerbated by temperature effects in the warmer months of the year. A systematic mathematical model for estimating and classifying the value of industrial risk for workers in the open air has been developed, which takes into account all the patterns of influence of the main dangerous factors of urban pollution and tested it for the conditions of Kyiv. The results of the work are relevant for improving the safety management of workers when performing road works due to the comprehensive consideration of all harmful factors in the assessment of industrial risk.

**Keywords:** industrial risk, automobile overpasses, system model, heat load index, influence of noise pollution, air substance.

О. В. Панова<sup>1</sup>, В. Ф. Фролов<sup>1</sup>, Л. О. Левченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

## МОНІТОРИНГ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ЗВУКОВОГО ТА ІНФРАЗВУКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ВИРОБНИЧЕ СЕРЕДОВИЩЕ ТА ЗАСОБИ ЙОГО ЗНИЖЕННЯ

**Анотація.** Проведено моніторинг низькочастотного звуку та інфразвуку на території міста у октавних смугах частот. Показано, що рівні цього чинника перевищують гранично допустимі значення у автомобільному та міському електричному транспорті. Ненормативні значення інфразвуку спостерігаються поблизу залізничного полотна. Виконано аналіз можливих підходів до зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку принаймні усередині будівель. Показано переваги та недоліки резонансних та мембранних панелей для поглинання низькочастотних пружних хвиль. Наведено розрахунковий апарат для визначення поглинальних властивостей конструкцій. Доведено, що для ефективного захисту конструкції повинно налаштуватися на мінімальні пікові частоти, що забезпечує поглинання хвиль вищих кратних ним частот. Запропоновано двошарову конструкцію, налаштовану на дві найбільш критичні звуки та інфразвукові частоти. Додаткове заповнення проміжку між ними та проміжку між конструкцією та поверхнею монтажу (стіна, стеля) стандартним шумопоглинальним матеріалом дозволяє підвищити загальний шумозахист. Надано розрахунок перфорованої шумозахисної панелі, яка застосовується у разі одного суттєвого піку у низькочастотній або інфразвуковій області. Така панель є ефективною, починаючи з частот 100–150 Гц. Запропоновано можливість одночасного зниження рівнів електромагнітних полів. Це досягається за рахунок додавання у проміжний шумопоглинальний матеріал металовмісної субстанції. Це може забезпечуватися застосуванням дрібнодисперсного концентрату залізної руди, який добре імпантується у будь-який матеріал і має низьку вартість. Показана можливість покриття жорстких елементів звукозахисної конструкції спеціальною фарбою для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Це забезпечить захист людей від двох найбільш критичних техногенних фізичних чинників.

**Ключові слова:** звук, інфразвук, резонансна частота, панель, звукопоглинальний апарат.

### Вступ

На сьогоднішній день захисту людей від впливу шуму у виробничих та побутових умовах приділяється багато уваги. Параметри та засоби захисту від акустичних впливів регламентуються загальними будівельними нормами захисту територій, будинків і споруд від шуму, зокрема, проектування засобів звукопоглинання та екранування. Рівні шуму, ультразвуку та інфразвуку у виробничих умовах регламентуються санітарними нормами [1]. Але більшість досліджень щодо визначення фактичних рівнів шумового навантаження стосуються частотних смуг звуку до яких найбільш чутливе людське вухо – 6-8 кГц. Відповідно, засоби захисту також розробляються найбільшою ефективністю на таких частотах. При цьому низькочастотному шуму – 20-500 Гц майже не приділяється уваги. Це ж стосується інфразвукових частот, які не сприймаються органами чуттів, але шкідливі для людського організму. В той же час спостерігається тенденція підвищення амплітудних значень низькочастотних звукових та інфразвукових хвиль у довкіллі та виробничому середовищі. Але найефективніші захисні конструкції, наприклад, у смугах 31,5 та 63 Гц забезпечують індекси зниження шуму 5-15 дБ, що у багатьох випадках є недостатнім. Значною мірою це пояснюється браком достовірних систематизованих даних щодо низькочастотного акустичного фону у відкритому просторі та у виробничому середовищі, а також амплітуд інфразвукових коливань. Наявність таких даних надасть можливість визначити підходи та розробити засоби, захисту від цих фізичних впливів.

**Огляд літературних джерел.** Більшість досліджень щодо зниження впливу на людей низькочастотного звуку та інфразвуку стосуються профілактичних заходів, тобто за рахунок застосування біологічно

активних речовин. Розгляд засобів захисту звичайно або межується констатацією проблеми [2], або моніторингом звукового та інфразвукового навантаження та довкілля або виробниче середовище [3]. У наведених роботах надано багато фактичного матеріалу (натурні вимірювання) та їх методики, але не наведено ефективності засобів або принципів їх розроблення.

У статті [4] представлено засіб захисту від впливу інфразвуку, але це звичайна панель Бекеші без будь-яких змін. Її недоліком є налаштування на резонансну частоту. В той же час коливання зі значними амплітудами можуть спостерігатися на кількох частотах, що є типовим для виробничих умов. Засоби захисту у цьому випадку повинні бути дещо іншими, або просто широкосмуговими. Для розроблення таких засобів необхідно мати достовірні дані щодо низькочастотного звуку та інфразвуку з боку діючого обладнання, транспортних засобів, електротехнічних об'єктів тощо.

**Метою роботи** є визначення джерел низькочастотного звуку та інфразвуку критичних амплітуд та розроблення засад проектування засобів захисту від їх впливу.

### Викладення основного матеріалу

Дослідження виконувалися із застосуванням натурних вимірювань. Вимірювання здійснювалися за допомогою каліброваного шумоміра Октава 110А у режимах «Звук» та «Інфразвук». У процесі досліджень оцінювалася критичність низькочастотного звуку та інфразвуку, генерованого різними джерелами та найбільш вагомі частоти (амплітудні значення). На першому етапі вимірювалися фонові рівні низькочастотного звуку та інфразвуку на території міста на великих відстанях від потенційних джерел шуму (табл. 1). Вимірювання до частоти 16 Гц здійснювалися за шкалою «Лін», 25 Гц і вище – «А». На наступ-

ному етапі було виміряно рівні низькочастотного звуку та інфразвуку найбільш поширених джерел (табл. 2,  $P$  – рівні звукового тиску, дБ;  $C$  – смуги переважних значень, Гц). Достовірні фактичні значення рівнів інфразвуку визначати достатньо складно.

Таблиця 1 – Фонові рівні низькочастотного звуку та інфразвуку на території міста

Частота, Гц	2	4	8	16	25	50	100	200	250
Фон, дБ	39	37	40	44	50	53	47	40	38

Таблиця 2 – Характеристики джерел низькочастотного звуку та інфразвуку

Джерело	$P$	$C$
Міський автотранспорт (у салоні)	85-120	4,0-31,5
Міський електротранспорт (у салоні)	75-82	2,0-20,0
Метрополітен (підземна ділянка)	92-110	4,0-31,5
Метрополітен (відкрита ділянка)	78-85	4,0-31,5
Залізничний транспорт (біля полотна)	88-110	8,0-50,0
Трансформатор (на території забудови)	75-85	2,0-50,0
Комп'ютерн. час (заняття, 10 роб. місць)	65-78	2,0-50

Постійний інфразвук нормується за рівнем звукового тиску у октавних смугах частот 2, 4, 8, 16 Гц. Нормованими характеристиками непостійного інфразвуку є еквівалентні за енергією рівні звукового тиску  $L_{екв}$  (дБ) у октавних смугах частот та еквівалентний загальний рівень звукового тиску у дБ Лін.

Еквівалентні за енергією рівні звукового тиску інфразвуку у стандартних октавних -смугах частот ( $L_{екв}$ ) та еквівалентний загальний рівень звукового тиску (дБ Лін.) визначаються за співвідношенням:

$$L_{екв} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^n t_i 10^{0,1L_i} ,$$

де  $T$  – період вимірювання, год;  $t_i$  – час впливу звуку з рівнем  $L_i$ , год;  $L_i$  – логарифмічний рівень інфразвуку у  $i$ -й проміжок часу, дБ;  $n$  – загальна кількість проміжків впливу інфразвуку.

Для орієнтовного визначення суттєвої присутності інфразвуку можна використовувати загальний рівень звуку, виміряний за шкалою «Лін.» та шкалою «А». Різниця показників  $L_{Лін} - L_A$  свідчить про рівень присутності інфразвуку. Вважається, що за різниці до 10 дБ присутність інфразвуку несуттєва; до 20 – помірно виражена; до 30 – суттєва; більше 30 дБ – критична. Наведене обумовлене тим, що інфразвук зазвичай супроводжується інтенсивним шумом. Але у реальних умовах нормативні рівні інфразвуку можуть генеруватися за нормативних рівнів звуку. Відомо, що захист від низькочастотних акустичних впливів, у тому числі і інфразвуку, дуже складний. Навіть сучасні засоби індивідуального захисту для частот звуку нижче 500 Гц неефективні (індекси зниження шуму не перевищують 15-12 дБ). У першу чергу це обумовлене великими довжинами звукових хвиль. Для інфразвуку довжина пружних хвиль більша за 21 м. У таких умовах традиційні шумопоглинальні матеріали не ефективні. Відомо, що найкращим засобом зниження амплітуд низькочастотних акустичних хвиль є мембранні поглиначі (щити Бекеші). Але їх недоліками є ефективність на одній (резонансній) частоті. У реальних

умовах таких (переважних) частот кілька. Тому потрібно розглянути можливість зниження амплітуд усієї низькочастотної смуги. У загальному випадку коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha$  визначається як:

$$\alpha = 1 - \left( \frac{\rho_M v_M - 413}{\rho_M v_M + 413} \right)^2 ,$$

де 413 – питомий акустичний опір повітря,  $\rho_M v_M$  – питомий акустичний опір поглинаючого матеріалу ( $\rho_M$  – густина матеріалу,  $v_M$  – швидкість звуку у ньому). Ця формула справедлива для нормального падіння хвилі. Для ефективної дії площа поверхні повинна бути дуже великою (принаймні перевищувати довжину падаючої хвилі). Це неприйнятно для дуже низьких та інфразвукових частот. Для цих частот частково (за великих розмірів) можна застосувати резонансні панелі. Їх резонансну частоту  $v_0$  можна розрахувати за співвідношенням:

$$v_0 = \frac{v_n}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_n}{md}} ,$$

де  $v_n$  – швидкість звуку у повітрі,  $\rho_n$  – густина повітря,  $m$  – маса одиниці поверхні панелі,  $d$  – товщина повітряного зазору між панеллю та площиною закріплення (стіною або іншою твердою поверхнею).

Але у цьому випадку за інфразвукових частот поверхнева маса  $m$  для інфразвукових частот повинна складати кілька десятків кілограмів.

Враховуючи наявність сучасних полімерних матеріалів високої міцності і малої товщини, для скранування низькочастотних звукових хвиль можливо застосувати мембранні панелі. Їх власну частоту коливань можна розрахувати таким чином:

$$v_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho_M ab}} ,$$

де  $F$  – сила натягнення мембрани;  $l, a, b$  – довжина, ширина і товщина мембрани;  $\rho_M$  – густина матеріалу мембрани.

Із сучасних матеріалів цілком можливо виготовити захисну конструкцію з індексом зниження низькочастотного звуку та інфразвуку до 25–30 дБ. Але така ефективність досягається тільки на власній (переважній) частоті. В умовах наявності кількох пікових частот конструкцію необхідно ускладнити. Слід відзначити, що для мембранних поглиначів резонансне поглинання відбувається на усіх частотах  $v_k = k v_0$ , де  $k$  – натуральне число.

Тому необхідно проектувати конструкції з переважними найменшими резонансними частотами. Вони визначаються вимірюванням рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку і обранням частот найбільших амплітуд. Доцільно обрати одну інфразвукову та одну звукову частоти. У цьому випадку на першому етапі обираються потрібні у даному конкретному випадку розміри панелі (довжина  $l$  та ширина  $a$ ). Підбиранням матеріалу ( $\rho_M$ ), його товщини та натягнення ( $F$ ) конструкція налаштовується на потрібну частоту. За наявності двох мембран можливо перекрити практично усю низькочастотну сму-



гу. Додатковим засобом зниження рівнів звуку високих частот є заповнення проміжку між мембранами та проміжком між мембраною та поверхнею монтажу (стіною) стандартними звукопоглинальними матеріалами. Попередні розрахунки і експерименти показали, що від такої конструкції не можна очікувати зниження рівнів звукового тиску більш ніж на 20–25 дБ, але з огляду на дані Таб. 2 це є прийнятним для більшості виробничих умов.

Досвід свідчить, що для забезпечення нормативних умов праці необхідно проводити повний акустичний моніторинг виробничого середовища з урахуванням рівнів інших фізичних чинників (наприклад, електромагнітної обстановки).

Якщо вимірювання показують один суттєво виражений інфразвуковий пік, то замість однієї мембранни доцільно використати перфоровану панель (з лицевого боку конструкції). Її переважна резонансна частота визначається зі співвідношення:

$$v_p = \frac{v_n}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{b_{ef} d^2 h}},$$

де  $v_n$  – швидкість звуку у повітрі;  $S$  – переріз отворів,  $b_{ef}$  – ефективна товщина листа,  $b_{ef} = \Delta + 0,5\sqrt{\pi S}$ ,  $\Delta$  – товщина листа,  $d$  – відстань між отворами,  $h$  – відстань від поверхні монтажу. Така структура ефективна для частот звуку більших за 100–150 Гц.

Перевагою двохшарової конструкції є можливість додавання у звукопоглинальний наповнювач проміжку металовмісної субстанції для додаткового екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону [9]. Застосований у цій роботі

залізорудний концентрат має низьку вартість і легко додається до будь-якого матеріалу. Одним з варіантів є покриття жорсткої поверхні фарбою, призначеною для екранування електромагнітних хвиль [10].

Наведений підхід надасть змогу знизити вплив на людей у виробничих та побутових умовах найбільш критичних фізичних чинників техногенного походження.

## Висновки

1. Моніторинг низькочастотного звуку та інфразвуку з боку найпоширеніших джерел шуму показав перевищення гранично допустимих рівнів у автомобільному та електричному транспорті та їх значні рівні біля трансформаторних підстанцій найбільш поширених потужностей.

2. Наведено прості у застосуванні розрахунки щодо проектування захисних конструкцій для зниження амплітудних значень низькочастотного звуку та інфразвуку. Розроблено методологічний підхід для проектування двошарової резонансної конструкції для одночасного зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку з одночасним зниженням акустичного впливу усього частотного діапазону

3. Запропоновано підхід до одночасного зниження впливу на людей у виробничих та побутових умовах акустичних та електромагнітних полів техногенного походження. Це досягається додаванням у проміжний звукопоглинальний пружний наповнювач металовмісної феромагнітної субстанції та покриття жорстких елементів акустичної панелі спеціальною фарбою для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99.-[Чинний від 1999-01-12]. - К.: МОЗ України, 1999. – 29 с.- (Державні санітарні норми України).
2. Zinkin V., Soldatov S., Bogomolov A., Dragan S., Actual problems of Population Protection from the Low-Frequency Noise and Infrasound. Civil Security Techology, vol. 12. 2015. №1. pp. 90-96.
3. Boczar T, Zmarzly D, Koziol M, et al. Measurement of Infrasound Components Contained in the Noise Emitted during a Working Wind Turbine. Energies. 2022; 15(2), no pp. 1-18. <https://doi.org/10.3390/en15020597>
4. Васильев А.В. К вопросу о снижении негативного воздействия инфразвукового излучения в условиях урбанизированных территорий, Машиностроение и машиноведение, 2020, № 5., с. 69-73

Received (Надійшла) 23.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.03.2022

## Monitoring of low-frequency sound and infrasound load on the production environment and means of reducing IT

O. Panova, L. Levchenko, V. Frolov

**Abstract.** The monitoring of low-frequency sound and infrasound in the city in octave frequency bands was carried out. It is shown that the levels of this factor exceed the maximum allowable values in road and urban electric transport. Non-normative values of infrasound are observed near the railway line. An analysis of possible approaches to reducing the levels of low-frequency sound and infrasound at least inside buildings. The advantages and disadvantages of resonant and membrane panels for the absorption of low-frequency elastic waves are shown. The calculation apparatus for determining the absorbing properties of structures is given. It is proved that for effective protection the structure must be tuned to the minimum peak frequencies, which ensures the absorption of waves of higher multiples of frequencies. A two-layer design tuned to the two most critical sound and infrasound frequencies is proposed. Additional filling of the gap between them and the gap between the structure and the mounting surface (wall, ceiling) with standard sound-absorbing material allows to increase the overall noise protection. The calculation of the perforated noise protection panel, which is used in the case of one significant peak in the low-frequency or infrasonic region, is given. Such a panel is effective from 100 to 150 Hz. The possibility of simultaneous reduction of electromagnetic field levels is proposed. This is achieved by adding a metal-containing substance to the intermediate sound-absorbing material. This can be ensured by the use of fine iron ore concentrate, which is well implanted in any material and has a low cost. The possibility of coating rigid elements of the soundproof structure with a special paint for shielding electromagnetic fields of a wide frequency range is shown. This will protect people from the two most critical man-made physical factors.

**Keywords:** sound, infrasound, resonant frequency, panel, sound-absorbing device.

Н. С. Урум, В. М. Іваненко, В. М. Федунів, О. В. Бажак

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технології, Ізмаїл, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ РЯТУВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИЖИВАННЯ ЕКІПАЖУ І ПАСАЖИРІВ ПІСЛЯ ПОКИДАННЯ СУДНА

**Анотація.** Розглянуто реалізацію відповідних способів та прийомів для підтримки безпечних умов виживання людини у водному середовищі, підготовку до дій у різних аварійних ситуаціях з використанням індивідуальних рятувальних засобів (рятувальні кола, рятувальні жилети, гідрокостюми та теплозахисні засоби, рятувальні мережі та трали) згідно Міжнародному Кодексу з рятувальних засобів (Кодекс ЛСА) викладені загальні вимоги щодо суднових рятувальних засобів, які стосуються виготовлення, встановлення та оснащення суднових рятувальних засобів, підготовлені на базі положень частини 3 глави III «Рятувальні засоби та пристрої» Конвенції SOLAS-74. Сприятливий результат виживання багато в чому залежить від його психофізіологічних та фізичних якостей, міцних знань основ безпеки життєдіяльності, виживання та інших факторів. При короткочасній загрозі людина діє на чуттєвому рівні, про якусь волю до життя в таких випадках годі й говорити. В умовах автономного довготривалого виживання настає критичний момент, коли безглуздість подальшого опору пригнічують волю. Бажання вижити має бути усвідомленим, цілеспрямованим і має диктуватися як інстинктом, а й усвідомленою необхідністю. Моральна готовність до аварійної ситуації на морі, насамперед, передбачає знання прийомів та засобів самопорятунку. Необхідно знати, як правильно використовувати наявні індивідуальні та колективні рятувальні засоби. Невмілі дії при використанні рятувальних засобів нерідко призводять до їхнього руйнування або малоєфективного використання. Часто під час аварій на воді рятувальники виявляють загиблих. Виною тому є неправильне використання рятувальних засобів. Саме тому на судах створюються всі необхідні умови для розгортання індивідуальних та колективних рятувальних засобів. Також, приділяється особлива увага навчанню екіпажу грамотно застосовувати це обладнання.

**Ключові слова:** індивідуальний рятувальний засіб, виживання, гідрокостюм, захисний костюм, рятувальне коло, рятувальний жилет.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Морські пасажирські та вантажні перевезення, на жаль, іноді супроводжуються аварійними ситуаціями та вимушеною евакуацією екіпажу та/або пасажирів. Коли люди опинилися протягом деякого часу в умовах автономного існування, для їх виживання необхідно використовувати аварійне спорядження, колективні та індивідуальні рятувальні засоби.

Рятувальні засоби класифікуються на такі основні види:

– *індивідуальні* – рятувальні кола, рятувальні жилети, гідротермокостюми, індивідуальні теплозахисні засоби;

– *колективні* – рятувальні та чергові шлюпки, надувні та жорсткі рятувальні плоту, рятувальні плаваючі прилади (капсули);

– *допоміжні пристрої та системи* – штормтрапи, спускові та посадкові пристрої, морські евакуаційні системи, рятувальні мережі та трали, лінеметальні пристрої.

У статті обмежимося аналізом індивідуальних рятувальних засобів, їх призначення, основних характеристик та правил застосування. Такі знання необхідні для забезпечення необхідних умов щодо виживання людей у разі вимушеного покидання ними судна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Забезпечення виживання екіпажу і пасажирів суден при виникненні аварійної ситуації є актуальним завданням і розглядається у низці праць [1-3, 5-16, 24-36, 43].

Але дані роботи не містять матеріалів щодо особливостей побудови та використання індивідуальних засобів порятунку.

Роботи в основному охоплюють питання, присвячені поводженню потерпілих при аварійному покиданні судна.

У роботі [4] у загальному вигляді розглянуті особливості застосування індивідуальних рятувальних засобів.

Але не висвітлені позитивні і негативні сторони окремих одиниць цього обладнання.

Фактично всі розглянуті заходи так чи інакше висвітлювалися у статтях, на сторінках всесвітньої павутини і навіть у вигляді сформованих нормативних документів [17-23, 36-42].

У цих роботах проведено узагальнення відповідних матеріалів задля досягнення поставленої мети статті.

**Мета статті.** Визначення порядку застосування індивідуальних рятувальних засобів для забезпечення виживання екіпажу і пасажирів при покиданні ними аварійного судна.

### Виклад основного матеріалу

Перед висвітленням основного матеріалу введемо до розгляду основні визначення, які стосуються індивідуальних рятувальних засобів.

*Захисний костюм* призначений для використання членами екіпажу, розписаних по чергових шлюпках або морських евакуаційних системах.

*Гідрокостюм* – захисний костюм, що зменшує втрату тепла тілом людини у холодній воді.

*Теплозахисний засіб* – мішок або костюм із во-

донепроникного матеріалу з низькою теплопровідністю.

*Рятувальна шлюпка (РШ) або рятувальний пліт (РП)* здатні забезпечити збереження життя людей, які зазнають лиха, з моменту залишення ними судна.

*Чергова шлюпка (ЧШ)* призначена для порятунку людей і збору рятувальних шлюпок і плотів на воді.

*Посадковий штормтрап* передбачений у місцях посадки у рятувальні шлюпки та на рятувальні плоти з метою безпечного в них доступу після спуску на воду.

*Спуск методом вільного спливання* – такий метод спуску рятувальної шлюпки або рятувального плоту, при якому вони автоматично роз'єднуються з судном, що тоне, і знаходяться в готовності до використання.

*Спуск методом вільного падіння* – такий метод спуску рятувальної шлюпки, при якому вона з комплектом людей і постачання на борту роз'єднується з судном і скидається на воду без будь-яких пристроїв, що її утримують.

*Надувний засіб* – засіб, плавучість якого забезпечена нежорсткими камерами, що заповнюються газом, і який зазвичай зберігається надутим до моменту підготовки його до використання.

*Морська евакуаційна система (МЕС)* – засіб для швидкого переміщення людей з посадкової палуби на рятувальні шлюпки та плоти, що знаходяться на воді.

У Міжнародному Кодексі з рятувальних засобів (Кодекс ЛСА), прийнятому 4 червня 1996 року на 66 сесії Комітету з безпеки на морі Міжнародної морської організації (КБМ ІМО) Резолюцією MSC, викладені загальні вимоги щодо суднових рятувальних засобів. Ці вимоги, що стосуються виготовлення, встановлення та оснащення суднових рятувальних засобів, підготовлені на базі положень частини 3 глави III «Рятувальні засоби та пристрої» Конвенції SOLAS-74.

Конвенція СОЛАС визначає мінімальні вимоги до обладнання суден рятувальними засобами. Національні вимоги держави-прапора щодо рятувальних засобів не можуть бути нижчими від вимог Конвенції СОЛАС-74 та Кодексу ЛСА, а можуть лише їх посилювати.

Відповідно до Конвенції SOLAS-74 та Кодексу LSA, рятувальні засоби повинні задовольняти таким вимогам:

- бути виготовленими із відповідного матеріалу;
- зберігати працездатність у діапазон температур повітря від -30 до +65°C і бути в робочому стані при температурі морської води від -1 до +30°C;
- бути стійкими до гниття, корозії і не повинні піддаватися надмірному впливу морської води, нафти або грибків;
- не втрачати своїх якостей при дії сонячних променів;
- бути пофарбованими в оранжевий колір;
- мати смуги зі світловідбиваючого матеріалу;
- мати чітко нанесене маркування, включаючи будь-які експлуатаційні обмеження;
- задовільно працювати за умов хвилювання.

Сучасні судна обладнані рятувальними засобами різноманітної конструкції, що потребує різного підходу до їх використання.

До індивідуальних рятувальних засобів зазвичай відносять: рятувальні кола, рятувальні жилети, гідрокостюми та теплозахисні засоби, рятувальні мережі та трали.

Розглянемо особливості їх використання.

Залежно від призначення та довжини судна на їх борту знаходиться від 2 до 30 *рятувальних кіл* (від 8 до 30 – на пасажирських суднах, від 8 до 14 – на вантажних суднах).

Причому конкретна кількість рятувальних кіл визначається вимогами Конвенції СОЛАС-74 та Кодексу ЛСА (табл. 1).

Таблиця 1 – Вимоги Конвенції СОЛАС-74 та Кодексу ЛСА щодо кількості рятувальних кіл на судні

Довжина судна, м	Мінімальна кількість рятувальних кіл судна
<i>пасажирського</i>	
до 60	8
від 60 до 120	12
від 120 до 180	18
від 180 до 240	24
240 і більше	30
<i>вантажного</i>	
до 100	8
від 100 до 150	10
від 150 до 200	12
200 і більше	14

До рятувальних кіл висуваються певні вимоги:

- зовнішній діаметр – більше 800 мм, внутрішній діаметр щонайменше 400 мм, маса трохи більше 2,5 кг;
- міцність, що витримує скидання з висоти 30 м;
- підтримання на плаву протягом 24 годин вантаж 14,5 кг;
- непідтримування горіння або продовження плавитись після повного охоплення полум'ям протягом 2 с;
- наявність на кожній стороні не менше чотирьох смуг зі світловідбиваючого матеріалу;
- наявність плавучого рятувального леєра діаметром 9,5 мм та довжиною не менше чотирьох зовнішніх діаметрів кола. Рятувальний леєр повинен бути закріплений по периметру кола в чотирьох рівновіддалених один від одного місцях, утворюючи чотири однакові петлі;
- виготовлення з негорючого пінопласту або піноприту й обшиті тканиною із синтетичного волокна, пофарбованість в помаранчевий колір з нанесенням назви порту приписки судна.

Додаткові вимоги щодо комплекту суднових рятувальних кіл:

- один (або більше) з кожного борту повинен мати рятувальний лин довжиною, що дорівнює подвійній відстані від місця встановлення кола до поверхні води, але не менше 30 м;
- половина рятувальних кіл, але не менше шести, повинні бути забезпечені вогнями, що самозапалюється, з джерелом живлення, що забезпечує тривалість горіння не менше 2 год;
- не менше двох кіл повинні мати автоматично діючі димові шашки, що дають дим протягом не менше 15 хв.

Крім того, вони повинні продовжувати димоутворення при зануренні у воду не менше ніж на 10 с.

Рятувальні кола будь-якої миті мають бути готові до застосування. Вони рівномірно розподіляються по бортах судна у легкодоступних місцях. Два рятувальні кола з samozапальними вогнями і димовими шашками, що автоматично діють розташовують на крилах ходового містка.

Порядок застосування рятувального кола:

- 1) добратися до кола та взятися двома руками за його поверхню;
- 2) натискаючи руками на коло, перекинути його через голову, на себе;
- 3) покласти руки на поверхню кола, зайняти зручне положення.

Діставшись до кола, слід не підніривати під нього, а лише перекидати.

Час виживання у воді залежить від спроможності людини максимально зберігати енергію та тепло.

Кількість рятувальних жилетів залежить від кількості людей, що знаходяться на судні, і завжди має бути на 5% більше від загальної кількості людей на судні. Так, необхідно враховувати, що вахтовий склад тривоги не може залишити свого місця. Тому на місцях несення вахти і у місцях, віддалених від розташування рятувальних шлюпок і плотів, повин-

ні знаходитися додаткові рятувальні жилети. На борту пасажирського судна можуть бути діти. Статистика показує, що дітей може бути до 10% від загальної чисельності людей на судні.

Тому, рятувальне постачання судна додатково містить дитячі жилети – 10% від кількості пасажирів.

Дитячі жилети мають менший розмір, напис "Для дітей", свисток, вогонь із джерелом енергії, розрахованим на 8 годин безперервної роботи.

Основні вимоги до рятувальних жилетів:

- забезпечення спливання потерпілого у невідомому стані; при цьому рот повинен бути на 12 см над водою під кутом 20-50°;
- забезпечення безпечного стрибання людини у воду з висоти 4,5 м;
- забезпечення можливості вільно плисти і піднятися на рятувальний засіб;
- зручність і швидкість надягання за час не більше 1 хв;
- розгортання тіла у воді за час не більше 5 с;
- мати комплект постачання (вогонь пошуку, морську батарейку, свисток, світловідбивні смуги), тавро перевірки та маркування.

Комплектація жорсткого рятувального жилета має відповідати вимогам СОЛАС-74. Запас плавучості такого жилета забезпечується водонаповнювачем, покритим вологостійкою тканиною оранжевого кольору.

Крім жорстких, застосовують надувні рятувальні жилети, що мають дві окремі камери, які при зануренні у воду надуваються автоматично від газового балончика (наприклад, CO<sub>2</sub>), а в необхідних випадках можуть надуватися ротом, для чого передбачена гнучка трубка з мундштуком.

Порядок користування рятувальним жилетом:

- взяти жилет зі штатного місця;
- перевірити повну комплектацію. При огляді жилета перед надяганням обов'язково перевірити: наявність лампочки, дротів до батарейки, штерту та пробок, що закривають отвори в батарейці, наявність сигнального свистка та його кріплення, стан ременів та пряжок;
- визначити бік надягання за розташуванням світловідбивних смуг і вогню пошуку;
- надягнути жилет через голову на шию.

Дія надувного рятувального жилета для людини, яка знепритомніла, полягає у такому. Протягом 5 с після занурення у воду людина спливає, розгортається, займає безпечне положення.

Рятувальні жилети розподілені між усіма особами на судні, а додаткові зберігаються у місцях несення вахт: у машинному приміщенні, на містку, у радіорубці.

При стрибках у воду необхідно:

- оглянути місце майбутнього приводнення;
- міцно притиснути жилет до грудей руками, віджимаючи вниз;
- зробити глибокий вдих;
- стрибнути ногами вперед, тримаючи їх разом або схрестивши, злегка зігнувши;
- закрити очі, голову тримати прямо.

Основним недоліком рятувальних жилетів є повна відсутність теплозахисту.

Тому час виживання тих, хто терпить лихо, одягнених у рятувальні жилети, повністю залежить від температури морської води і в зимовий час вимірюється хвилинами. В останні роки на судах стали застосовувати гідротермокостюми та теплозахисні засоби.

Відповідно до вимог гідротермокостюми, передбачаються тільки для кожної людини, розписаної на чергову шлюпку або морську евакуаційну систему.

Разом з тим, намітилася тенденція щодо постачання гідротермокостюмами всього екіпажу судна.

На судах застосовують костюми різних конструкцій.

Але всі вони відповідатимуть таким основним вимогам:

- спроможність самостійно одягнути костюм за час не більше 2 хв;
- повна комплектація необхідним постачанням – світловідбивні смуги, рятувальний лин, вогонь пошуку, сигнальний свисток, рятувальний пояс з карабіном;
- можливість стрибати у гідротермокостюмами з висоти 4,5 м;
- свобода переміщення, що дозволяє піднятися вертикальним трапом на висоту до 5 м і виконувати роботи зі спуску рятувальних засобів;
- теплозахист, що забезпечує виживання людини за низьких температур.

У маркуванні костюма вказується гарантований час теплозахисту: костюми ГТК-6 – при температурі води 0-2°C за 6 годин температура тіла не повинна падати більш ніж на 2° С; ГТК-1 – при температурі води 5°C за 1 год температура тіла не повинна падати більш ніж на 2°C.

Гідрокостюм водонепроникно закриває все тіло людини, крім обличчя. Деякі костюми забезпечені прозорими каптурами, що оберігають обличчя від попадання бризок. Костюми виготовляють різних розмірів.

За плавучістю розрізняють костюми: ізолюючий – не має плавучості і вимагає надягання поверх гідрокостюму рятувального жилета; підтримуючий та ізолюючий – поєднує функції гідрокостюму та рятувального жилета.

Порядок користування гідротермокостюмом:

- дістати костюм, оглянути його, перевірити комплектацію постачання;
- надягти штанини і застебнути хлястики на ногах;
- просмикнути руки в рукави і надіти рукавички;
- надіти каптур, вичавити повітря зі штанин і застебнути герметичну блискавку;
- застебнути рятувальний пояс та обтюратор;
- перед стрибком у воду закрити обличчя рукавичками.

Індивідуальні теплозахисні засоби виготовляють із водонепроникного матеріалу із низькою теплопровідністю у вигляді костюмів або мішків.

Теплозахисний засіб закриває все тіло, за винятком обличчя, і служить для попередження переохолодження (гіпотермії) людей, що працюють у холодній воді та рятуються.

У постачання кожної рятувальної шлюпки та плоту повинні входити теплозахисні засоби у кількості 10% місткості людей, але не менше двох.

Повне забезпечення екіпажу гідротермокостюмами значно збільшує шанси на порятунок при загибелі судна.

Розглянемо гідротермокостюми нового покоління «Е-38-001».

Вони виготовляються фірмою «Нарвал», мають один розмір і за допомогою спеціальних застібок пряжками та манжетами підганяються під людину будь-якої фігури та комплектності. Манжети на зап'ястях та на шиї і чоботи зі спеціальними кріпленнями забезпечують щільне прилягання до тіла і, отже, повну водонепроникність.

Додаткова теплоізоляція та плавучість забезпечуються легким надуванням костюма за допомогою клапана та шланга діаметром 2,5 см, що зберігаються у кишені костюма.

Знімна конструкція рукавичок забезпечує повну свободу рухів рук, що є важливим в аварійних ситуаціях.

Неопренові чоботи з ребристою подошвою, приварені безпосередньо до костюма, у поєднанні з прямим покромом нижньої частини костюма, усувають накопичення повітря, відпадає потреба в клапанах для його випуску.

Це сприяє збереженню горизонтального положення у воді.

Капюшон пришитий до костюма, проте він легко відкидається назад.

Відбивач хвиль оберігає від їхнього впливу рот і ніс плавця.

Рятувальна стрічка з великим кільцем для захоплення з вертольота або борту рятувального судна постійно прикріплена до костюма, що підвищує її надійність.

До цієї стрічки прикріплений лин для можливого контакту з іншими рятованими.

На шести ділянках костюма пришита люмінесцентна стрічка, що полегшує пошуки потерпілих у нічних умовах.

Плавуча подушка, розташована під потилицею, зручна в положенні на спині, створює вигідний кут огляду горизонту, а також додатковий запас плавучості, що не залежить від надувного пристрою.

Це особливо важливо в умовах, коли використовувати надувний пристрій з будь-яких причин неможливо.

Водонепроникність швів забезпечується чотириразовим проклеюванням. Потім вони обшиваються особливо міцною нейлоною ниткою. Герметичність швів кожного костюма перевіряється під тиском.

Іншим видом продукції фірми «Нарвал» є термічна відновлювальна капсула (ТВК), розроблена для запобігання та лікування гіпотермії в умовах холодного або вологого середовища.

Вона забезпечує порятунок людей, що зазнали переохолодження, в арктичних районах, віддалених від медичних стаціонарів.

В основу конструкції ТВК покладено принцип пасивного прогрівання, зберігання тепла, виділеного від людини, і повернене його постраждалому.

Після вилучення потерпілого з води він повинен бути негайно поміщений у ТВК в одязі. Капсула зроблена з тканини «Декупад», завдяки якій, волога з одягу постраждалого внаслідок капілярного процесу швидко видаляється.

Крім того, ворс тканини «Декупад» не приминається людським тілом, що лежить на ньому.

Тому не потрібна жодна додаткова теплова ізоляція для скорочення теплових втрат, навіть якщо ТВК з поміщеною в неї людиною знаходиться на землі або на сталевій палубі судна.

«Декупад» має:

антиалергічні, антитоксичні, бактерицидні властивості,

не горить,

легко піддається машинному пранню,

стерилізації в автоклаві,

зберігає колір,

брудовідштовхувальні властивості, забезпечує дренаж,

вільно пропускає повітря.

ТВК обладнана шістьма стрічковими стропами для полегшення її перенесення, передачі з борту судна на борт іншого судна або гелікоптер.

За допомогою традиційних рятувальних засобів досить складно допомогти людині, яка зазнає лиха в морі. Потрібні маневри судна та спуск на воду рятувальної шлюпки, на що витрачається чимало часу. Все це особливо ускладнюється в штормових умовах і за низьких температур морської води, коли час виживання людини в морі вкрай обмежений.

На деяких суднах, особливо рибальських, застосовують рятувальні мережі. Вони застосовуються так. Людині, виявленій за бортом, викидається рятувальний лін з кільцем, використовуючи які, він дістається мережі з поплавцями, і дві людини за шкити піднімають мережу з постраждалим на борт судна. У підкомітеті ІМО з безпеки мореплавання розглядається питання про включення рятувальних мереж у комплект обов'язкового рятувального постачання суден.

Відома інша, більш досконала, конструкція рятувальної мережі, яка викидається постраждалому як вручну, так і за допомогою лінеметального пристрою, що дозволяє закинути мережу на велику відстань. Мережа забезпечена самозапалювальним вогнем пошуку, що дозволяє потерпілому знайти її навіть у темний час доби.

### Висновки

При наданні допомоги людині, яка перебуває у воді, необхідно пам'ятати, що часу, що витрачається на маневрування судна, підготовку та спуск плавзасобів, може не вистачити для порятунку потопаючого. У деяких випадках штормові умови і аварійний стан судна створюють умови, коли порятунок людини, яка зазнає лиха, взагалі неможливо.

Але у будь-якому випадку на суднах створюються всі необхідні умови для розгортання індивідуальних та колективних рятувальних засобів. Іншим важливим завданням є навчання екіпажу грамотному застосуванню цього обладнання.

Крім того, на спеціалізованих рятувальних судах для порятунку людей, що у воді, крім колективних рятувальних засобів, використовуються: бортові рятувальні мережі, рятувальні мережі з поплавками та плотами, носові рятувальні мережі, рятувальні трали.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Актуальные проблемы здравоохранения на морском транспорте: материалы научно-практической конференции / под ред. О.Н. Сорокина, В.А. Капцова, С.Д. Кривули. М.: ВНИИЖГ, 2009.
2. Бубнов В.Г., Бубнова Н.В. Атлас добровольного спасателя. Первая медицинская помощь на месте происшествия: учебное пособие. М.: АСТ и Астрель, 2014.
3. Бубнов В.Г. Основы медицинских знаний: учебно-практическое пособие. М.: АСТ; Астрель, 2012.
4. Коллегаев М.А., Иванов Б.Н., Басанец Н.Г. Безопасность жизнедеятельности и выживание на море. Одесса: НУ ОМА, 2008.
5. Кукин П.П., Лапин В.Л., Пономарев Н.Л. Безопасность жизнедеятельности. Производственная безопасность и охрана труда: учебное пособие. М.: Высш. шк., 2011.
6. Мендельсон Э.Л. Официальная терминология трудовых отношений и безопасности труда: словарь-справочник. М.: Безопасность труда и жизни, 2005.
7. Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке водным транспортом. М.: Транспорт, 2004.
8. Здравоохранение на транспорте и в транспортном строительстве. / В.М. Сибилев, О.Н. Сорокин, А.А. Прохоров, В.А. Кудрин. М.: Транспорт, 2012.
9. Фесенко В.А. Пожарная безопасность на водном транспорте: учебное пособие. Новосибирск: СГУПС, 2013.
10. Ключкова Е.А. Охрана труда на морском транспорте: учебник. М.: Маршрут, 2014.
11. Консолидированный текст конвенции СОЛАС-74/83. С.-Петербург: ЦНИИМФ, 1993. 757 с.
12. Международная конвенция по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты 1978 года (ПДМНВ-78), измененная Конференцией 1995г. СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1991. 551 с.
13. Кузьмин С.А. Обеспечение выживания мореплавателей в чрезвычайных ситуациях на море. Калининград: БГА РФ, 1998. 150 с.
14. Подготовка курсантов к действиям в экстремальных ситуациях на море. / С.А. Кузьмин, А.В. Белов, С.П. Соловьев, В.Г. Гурьев. Калининград: БГА РФ, 2009. 91 с.
15. Жуков Е.И. Судовые спасательные средства. М.: Транспорт, 2004. 196 с.

16. Дидык А.Д. Управление судном и его техническая эксплуатация. М.: Транспорт, 1990. 216 с.
17. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС74). Одесса: Изд. Центр «Студия» Негоциант», 2004.
18. Международная конвенция по поиску и спасанию на море, 1979 (SAR). Одесса: Астропринт, 1998.
19. Международная конвенция и кодекс о подготовке и дипломированию моряков и несению вахты ПДНВ-78/95. Одесса: Изд. Центр «Студия» Негоциант», 2005.
20. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78). Одесса: Изд. Центр «Студия» Негоциант», 2005.
21. Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предупреждению загрязнений – МКУБ (гл. IX СОЛАС-74) ISM CODE. Одесса: Изд. Центр «Студия» Негоциант», 2005.
22. Международное руководство по методологии синтетики в медицине. Женева: ВОЗ, 1992.
23. Позолотин Л.А., Торский В.Г. Международные конвенции, кодексы, рекомендации ИМО и МОТ. Одесса: Астропринт, 1998.
24. Пожарная безопасность на судах / пер. с англ. Т.Г. Селецкой и М.Г. Ставицкого. М.: МУПК, 1998.
25. Топалов В.П., Торский В.Г. Уроки морских аварий. Одесса: Астропринт, 2004.
26. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Регистр. С.-Пб.: Транспорт, 1995.
27. Правила морской перевозки опасных грузов. М.: Мортехинформреклама, 1990.
28. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
29. Yaloveha V., Hlavcheva D., Podorozhniak A. Usage of convolutional neural network for multispectral image processing applied to the problem of detecting fire hazardous forest areas. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 1. С. 116–120. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.19>
30. Кучук Н. Г. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних / Н. Г. Кучук, В. Ю. Мерлак, В. В. Скороделов // *Сучасні інформаційні системи = Advanced Information Systems*. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 97-102. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>
31. Nechausov A., Mamusuć I., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 21 – 26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>
32. Кучук Н.Г., Гавриленко С.Ю., Лукова-Чуйко Н.В., Собчук В.В. Перерозподіл інформаційних потоків у гіперконвергентній системі / С.Ю. Гавриленко. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 2. С. 116-121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.20>.
33. Зиков І. С., Кучук Н. Г., Шматков С. І. Синтез архітектури комп'ютерної системи управління транзакціями e-learning. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 3. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>.
34. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 117–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>.
35. Степаненко А.Г., Трубачев Ю.В. Офицер по охране судна : уч. пособие / под общ. ред. Пипченко А.Н. Одесса: Морской тренажерный центр, 2005.
36. Типовой курс ИМО – 1.11. МАРПОЛ – 73/78. 2003.
37. Типовой курс ИМО – 1.13. Несчастные случаи, касающиеся здоровья. Основы подготовки. 2003.
38. Типовой курс ИМО – 1.14. Несчастные случаи. Первая помощь. 2003.
39. Типовой курс ИМО – 1.15. Медицинский уход. 2003.
40. Типовой курс ИМО – 1.19. Личное выживание. 2003.
41. Типовой курс ИМО – 1.20. Основы противопожарной подготовки. 2003.
42. Типовой курс ИМО – 2.03. Расширенная программа подготовки по борьбе с пожарами. 2003.
43. Управление борьбой с пожарами на судах : учебное пособие. Одесса: ОГМА-ЦПАП, 1997.

Received (Надійшла) 12.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.03.2022

### The use of personal life-saving appliances for the survival of the crew and passengers after leaving the ship

N. Urum, V. Ivanenko, V. Fedunov, O. Bazhak

**Abstract.** The implementation of appropriate methods and techniques for maintaining safe conditions for human survival in the aquatic environment, preparation for action in various emergencies using individual life-saving equipment (lifebuoys, life jackets, wetsuits and protective equipment, life nets and trawls) according to the International Rescue Code (LSA Code) sets out the general requirements for life-saving appliances for the manufacture, installation and equipment of life-saving appliances, prepared on the basis of the provisions of Part 3 of Chapter III "Life-saving appliances and devices" of the SOLAS-74 Convention. A favorable outcome of survival largely depends on its psychophysiological and physical qualities, strong knowledge of the basics of life safety, survival and other factors. With a short-term threat, a person acts on a sensory level, there is no need to talk about any will to live in such cases. In the conditions of autonomous long-term survival there comes a critical moment when the futility of further resistance suppresses the will. The desire to survive must be conscious, purposeful and dictated not only by instinct but also by conscious necessity. Moral preparedness for an emergency situation at sea, first of all, requires knowledge of techniques and means of self-rescue. You need to know how to properly use existing individual and collective rescue equipment. Clumsy actions when using rescue equipment often lead to their destruction or ineffective use. Rescuers often find dead during water accidents. This is due to improper use of rescue equipment. That is why the ships create all the necessary conditions for the deployment of individual and collective rescue vehicles. Also, special attention is paid to training the crew to use this equipment correctly.

**Keywords:** personal rescue vehicle, survival, wetsuit, protective suit, lifebuoy, life jacket.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Андрєєв С. М.	4	Ковальова А. В.	121	Полікарпова Г. В.	102
Бажак О. В.	131	Ковальчук Д. М.	65	Попов І. І.	111
Бандурка О. І.	13	Коломійцев О. В.	57	Рибальченко А. О.	57
Барабаш О. В.	38	Колтун Ю. М.	75	Саул-Гоє Д. К.	4
Бараненко Р.	62	Колумбет В. П.	38	Свинчук О. В.	13
Барковська О. Ю.	43	Константинова Л. В.	84	Сисоєв І. К.	81
Бельорін-Еррера О. М.	30	Кошман С. О.	65	Смірнов О. А.	84
Волк М. О.	48	Краснобаєв В. А.	65	Смірнов С. А.	84
Гавриленко В. В.	81	Кусков М. А.	30	Смірнова Т. В.	84
Гавриленко С. Ю.	52	Кучук Г. А.	90	Сухотеплий В. М.	75
Гапон Д. А.	19	Лактіонов О. І.	34	Толкунов І. О.	111
Голубничий Д. Ю.	57, 75	Левченко Л. О.	127	Третяк В. Ф.	57
Горелик С. І.	4	Лещенко В. М.	19	Трикоз В. В.	98
Гулак О. С.	94	Лисиця Д. О.	90	Урум Н. С.	131
Денисенко М. А.	19	Лунін Д. О.	19	Федунов В. М.	131
Дяченко О.	62	Лунічкін О. Г.	48	Франчук Т.	62
Запововський М. Й.	23	Малохвій Е. Е.	71	Фролов В. Ф.	127
Зиков І. С.	23	Мартиненко А. М.	98	Холєв В. О.	43
Зозуля В. Д.	52	Мартовицький В. О.	75	Чуйко О. А.	90
Зуєв А. О.	19	Мезенцев М. В.	23	Шаповалова С. І.	94
Іваненко В. М.	131	Михайленко О. В.	34	Шефер О. В.	34
Іванець Г. В.	111	Молчанов Г. І.	71	Якименко Н. М.	84
Іванець М. Г.	111	Нечаусов А. С.	4	Янко А. С.	98
Калінін Є. І.	30	Носков В. І.	23	Янковська Д. О.	102
Капітон А.	62	Панова О. В.	127	Янковський О. А.	102
Ключка Я. О.	57	Паржин Ю. В.	71	Ярошевич Р. О.	106
Коваленко А. А.	106	Поліканов Д. А.	43		

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 1 (67)

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. Льїна*

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

Підписано до друку 2.04.2022. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 13,0. Тираж 120 прим. Зам. 204-22  
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 № 24800000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34  
e-mail: [bookfabrik@mail.ua](mailto:bookfabrik@mail.ua)