



# СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

2(60) ' 2020

Заснований  
у 2007 році

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

**Засновник:**  
Полтавський національний технічний  
університет імені Юрія Кондратюка

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

**Телефон:** +38 (050) 302-20-71  
(консультації, прийом статей).

**E-mail:**  
kuchuk\_nina@ukr.net

**Інформаційний сайт:**  
<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

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

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор  
Журнал індексується міжнародними бібліометричними та наукометричними базами даних: Index Copernicus (Польща),  
General Impact Factor (ЄС), Google Scholar (США), Academic Resource Index (ЄС), Scientific Indexed Service (США).

Затверджений до друку вченою радою Національного університету  
"Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" (протокол від 28 травня 2020 року № 14)

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

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

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

### Голова:

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

### Заступник голови:

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

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

### Члени:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ЛУКОВА-ЧУЙКО Наталія Вікторівна, (д-р техн. наук, доц., Київ)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Відповідальний секретар:

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

## З М І С Т

### КОНТРОЛЬ КОСМІЧНОГО ТА ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

<i>Гаєвський С. В., Балакірева С. М., Кулаков І. П.</i> Розробка загальних положень з розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака .....	3
<i>Колесник А. В., Бойко А. В., Міценко Т. Ю., Руденко В. М.</i> Розробка моделі знань для інформаційної системи підтримки прийняття рішень авіаційним оператором при виникненні особливих випадків в польоті .....	12
<i>Сорока М. Ю.</i> Метод адаптації поведінки агентів в інтелектуальній навчальній системі підготовки диспетчерів управління повітряним рухом .....	17

### УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Кононов В. Б., Кононова О. А., Мусаїрова Ю. Д.</i> Обґрунтування вимог до сучасних способів та засобів визначення загального технічного стану бензинових та дизельних двигунів військових електростанцій та силових установок зразків озброєння та військової техніки .....	21
<i>Леві Л. І.</i> Керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки .....	27
<i>Макогон О. А., Губа С. М., Мащенко С. І., Горбов О. М., Мартиненко О. В., Ковальов І. О.</i> Побудовування часової прямої життєвого циклу зразка танка Т-64Б та визначення оптимальної періодичності його технічного обслуговування .....	31
<i>Носков В. І., Блиндюк В. С., Мезенцев М. В., Гейко Г. В.</i> До питання вибору електричної трансмісії та її системи управління для спеціальної колісної машини .....	36
<i>Федорович О. Є., Прончаков Ю. Л.</i> Метод та моделі вибору тракторії руху підприємства, що розвивається до найближчої цілі реформування .....	40

### ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

<i>Любий Є. В., Ларін Д. О.</i> Підхід щодо формування мережі зарядних станцій електромобілів у напрямку Харків-Бердянськ ...	44
<i>Очеретенко С. В., Огульчанська Д. С.</i> Підвищення ефективності світлофорного регулювання на перехресті .....	51

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Breslavets J., Nehme M.</i> The development of educational computer games .....	56
<i>Haitan O., Nazarov O.</i> Hybrid approach to solving of the automated timetabling problem in higher educational institution .....	60
<i>Кучук Г. А., Коваленко А. А., Лукова-Чуйко Н. В., Криволапов І. Ю.</i> Розпізнавання ділянок вирубки лісів з використанням згорткових нейронних мереж .....	70
<i>Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Ониськів П. А., Триснюк В. М., Зозуля А. М.</i> Методи статистичного опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю на основі його моделі у вигляді вектора стаціонарних випадкових послідовностей .....	75
<i>Міхав В. В., Мелешко Є. В., Якименко М. С.</i> Метод зберігання даних рекомендаційної системи на основі бінарних діаграм рішень .....	85
<i>Раскін Л. Г., Сіра О. В., Корсун Р. О.</i> Декомпозиційний метод вирішення завдань аналізу марковських систем високої розмірності .....	90
<i>Rukkas K., Zholtkevych G.</i> Load balancing consistency in a distributed datastore .....	95
<i>Смірнова Т. В.</i> Формування евристичних правил, бази знань та формалізація структури й правил технологічного процесу для оптимізаційної хмарної інформаційної системи .....	101
<i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О., Лециньська І. О.</i> Модель інтерфейсу пояснень з темпоральними параметрами в рекомендаційній системі .....	105

### ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Глива В. А., Матвєєва І. В., Левченко Л. О., Кічата Н. М.</i> Проектування композитних матеріалів на основі дрібнодисперсної заліззовмісної субстанції для екранування іонізуючих випромінювань .....	110
<i>Данова К. В.</i> Аналіз функціональних станів людини-оператора з інвалідністю у контексті забезпечення безпеки праці ...	114
<i>Касаткіна Н. В., Тихенко О. М., Фурсенко О. М.</i> Розрахункові методи проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями .....	118
<i>Мікосянчик О. О., Кічата Н. М., Савицька Т. М., Рігус Д. А.</i> Аналіз пожежної небезпеки та розробка профілактичних заходів щодо її зниження на спеціалізованій ділянці відновлення деталей автомобілів .....	122
<i>Панова О. В.</i> Дослідження захисних властивостей металевих електромагнітних екранів та визначення умов їх максимальної ефективності .....	127
<i>Халмуратов Б. Д., Багрій М. М.</i> Засади розроблення матеріалів і конструкцій виготовлення засобів індивідуального захисту від впливу електричних полів .....	131
<i>Шпак С. В., Кислиця С. Г., Кожушко Г. М., Сахно Т. В., Багіров С.</i> Мерехтіння освітленості та стробоскопічний ефект, що утворюють світлодіодні лампи та світильники .....	135

### ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОЛОКАЦІЯ

<i>Bayratov A. A., Pashaev A. B., Sabziev E. N., Imanov R. R.</i> The model of optimal radioelectronic stations deployment in the military field communication site .....	144
<i>Бакуменко Б. В., Артемиченко Б. І., Сухоруков М. В., Мельник Д. М.</i> Модель розрахунку часу на передислокацію радіотехнічного підрозділу з урахуванням організаційно-штатних змін .....	148
<i>Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С.</i> Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах .....	152
<i>Ліщенко В. М.</i> Метод обробки некогерентних сигналів в мультирадарній системі однотипних двокоординатних оглядових радіолокаційних станцій .....	160
<i>Сакович Л. М., Криховецький Г. Я., Гиренко І. М., Мирошніченко Ю. В.</i> Метод розробки алгоритмів діагностування радіоелектронних комплексів .....	164
<i>Серков О. А., Трубочанінова К. А., Лазуренко Б. О.</i> Завадостійкість мобільних телекомунікаційних систем .....	169
<i>Слюсарь І. І., Слюсар В. І., Зуб С. В., Телешун Д. Ю.</i> Ширококуглові антени на основі кільцевої геометрії .....	173
<i>Shyshatskyi A., Cherniak O., Lyashenko A., Paniuk S., Doroshets A., Savenko V., Mazurenko V., Hryhorak S.</i> Development of theoretical provisions of transmission of discrete messages of military radiocommunication systems .....	180

<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	184
----------------------------------	-----

# Контроль космічного та повітряного простору

УДК 621.865.1+5197

doi: 10.26906/SUNZ.2020.2.003

С. В. Гаєвський<sup>1</sup>, С. М. Балакірева<sup>2</sup>, І. П. Кулаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

<sup>3</sup> Командування Сил Логістики Збройних Сил України, Київ

## РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНИХ ПОЛОЖЕНЬ З РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ЛІТАКА

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є процеси функціонування радіоелектронної системи сучасного літака, її комплектуючих елементів та функціональних вузлів як об'єкта визначення та розрахунку залишкового ресурсу. **Метою** є проведення аналізу існуючого методичного апарату, що застосовується для розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака та пошуку шляхів його вдосконалення. **Завдання:** Розробити загальні положення по розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака. Аналізованими **методами** є: розрахунково-експериментальні методи обчислення надійності, залишкового ресурсу та потоку відмов радіоелектронної системи літака. Отримані такі **результати**. Розроблено ієрархічну схему розрахунку типу дерево: "радіоелектронна система літака – функціональна система – функціональний вузол (блок) – комплектуючий виріб", процедуру розбиття схемних позицій на невідновлювані та відновлювані об'єкти. **Висновки.** Сформульовано загальні положення по розрахунку параметра потоку відмов та оцінки технічного стану радіоелектронної системи літака для вирішення завдань продовження ресурсів.

**Ключові слова:** залишковий ресурс, літак, показник, продовження терміну служби, радіоелектронна система, технічний стан.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Науково-технічний прогрес і пов'язане з ним вдосконалення елементної бази істотно змінюють характер експлуатації та технічного обслуговування радіоелектронних систем (РЕС) сучасних літаків. Широке застосування апаратури виготовленої з використанням мікроелектронних компонентів, впровадження сучасних цифрових технологій з високим ступенем інтеграції робить проблематичним застосування існуючого науково-методичного апарату для розрахунку залишкового ресурсу та показників безвідмовності радіоелектронної системи літака. Вказані факти обумовлюють необхідність критичного аналізу відомих підходів та методик для розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронних систем літаків в цілому та їх схемних позицій зокрема [1].

**Аналіз літератури.** Аналіз літератури [2-7] показав, що на сучасному етапі не в повній мірі враховано впровадження в радіоелектронну апаратуру сучасної елементної бази. Широке застосування комплектуючих елементів в мікроелектронному виконанні призводить до кардинальних змін потоків відмов в радіоелектронних системах [8-19]. Застосування відомих параметричних та імовірнісних методів оцінки надійності та безвідмовності роботи не дає змоги отримати адекватні результати [20, 23].

Даний факт тягне за собою необхідність вдосконалення існуючого науково-методичного апарату,

що застосовується для розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака.

**Мета статті** – проведення аналізу існуючого методичного апарату, що застосовується для розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака та пошуку шляхів його вдосконалення.

### Основна частина

**Загальні положення по розрахунку залишкового ресурсу РЕС літака.** Для розв'язання задачі продовження ресурсу РЕС літака пропонується ієрархічна схема розрахунку показників залишкового ресурсу (ЗР). Радіоелектронні засоби літака, або його складові частини розбиваються на функціональні системи (ФС), кожна ФС – на функціональні вузли (ФВ), блоки, які, в свою чергу, розбиваються на комплектуючі вироби (КВ). При цьому, як правило, РЕС літака представляється чотирирівневою ієрархічною структурою типу "дерево": РЕС літака – ФС – ФВ (блоки) – КВ (рис. 1). На кожному рівні утворюються свої підсистеми відповідно до принципу декомпозиції. Така схематизація дозволяє досліджувати підсистеми окремо, використовуючи для розрахунку показники надійності їх складових частин прості дворівневі структури типу "система – елементи". При цьому, починаючи з нижнього рівня, рекурентно обчислюються характеристики надійності всіх елементів схеми від КВ до РЕС літака в цілому.

На кожному новому етапі розрахунків системою буде один з елементів схеми більш високого ієрархічного рівня, а її складові частини – елементи

найближчого нижчого ієрархічного рівня, показники надійності яких визначені на попередньому етапі. Така схема розрахунку залишкового ресурсу дозволяє більш повно розраховувати і аналізувати показники довговічності РЕС літака і більш ефективно вирішувати завдання продовження її ресурсу. Порядок розрахунків показників залишкового ресурсу та інших показників надійності РЕС літака представлені у вигляді блок-схеми розрахунку на рис. 2.

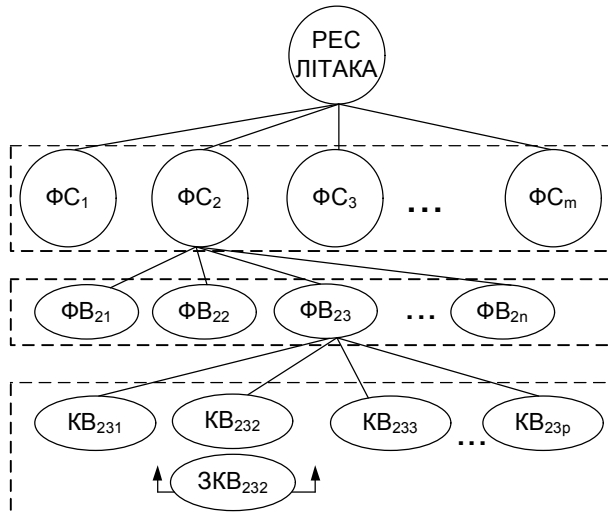


Рис. 1. Загальна структурна схема РЕС літака (ФС<sub>1</sub>, ФС<sub>2</sub>, ..., ФС<sub>m</sub> - функціональні системи; ФВ<sub>21</sub>, ФВ<sub>22</sub>, ..., ФВ<sub>2n</sub> - функціональні вузли; КВ 231, КВ 232, ..., КВ 23р - комплектуючі вироби; ЗКВ232 - запасні КВ)

Нижче викладені загальні положення по розрахунку показників залишкового ресурсу та пояснення до блок-схеми (рис. 2).

Інформаційна база (блок 1) формується на основі збору, аналізу та узагальнення наявної на початок робіт з продовження ресурсу інформації про безвідмовність, довговічність та зберігання КВ, ФВ і ФС РЕС літака. Інформаційна база ґрунтується на систематизації та узагальнених даних про надійність КВ, ФВ, ФС, отриманих на всіх етапах їх життєвого циклу у розробника, виробника та експлуатуючих організацій РЕС літака. До них можна віднести:

- систематизацію даних про умови експлуатації літака і його складових частин;
  - систематизацію даних про процеси старіння, моделі відмов, моделі досягнень граничних станів комплектуючих елементів (КЕ), КВ, ФС РЕС літака;
  - узагальнення навантажувальних режимів КВ, ФВ, ФС РЕС літака і ін.
- Додаткові дані про показники надійності КВ, ФВ, ФС отримують за результатами їх ресурсних випробувань і випробувань РЕС літака:
- попередні (доводочні) та приймальні випробування;
  - контрольні випробування, мета яких полягає в перевірці відповідності виробів вимогам ТУ, заданим рівнем надійності;
  - дослідні випробування, які охоплюють сферу експериментального вивчення виробів і факторів, що впливають на надійність КВ, ФВ РЕС літака;

- експлуатаційні спостереження, які, в свою чергу, доцільно розрізняти за видами експлуатації: опитні, підконтрольні, лідерні, штатні.

У задачі продовження ресурсів важливою інформацією є інформація про результати лідерної і підконтрольної експлуатації, а також результати досліджень випробувань, що проводяться після напруження РЕС літака призначених ресурсів і (або) термінів служби з метою визначення показників залишкового ресурсу.

Відзначимо, що до складу РЕС літака входять, як правило, ідентичні складові частини, ФС, ФВ (блоки) та КВ, що полегшує задачу оцінки показників надійності РЕС літака.

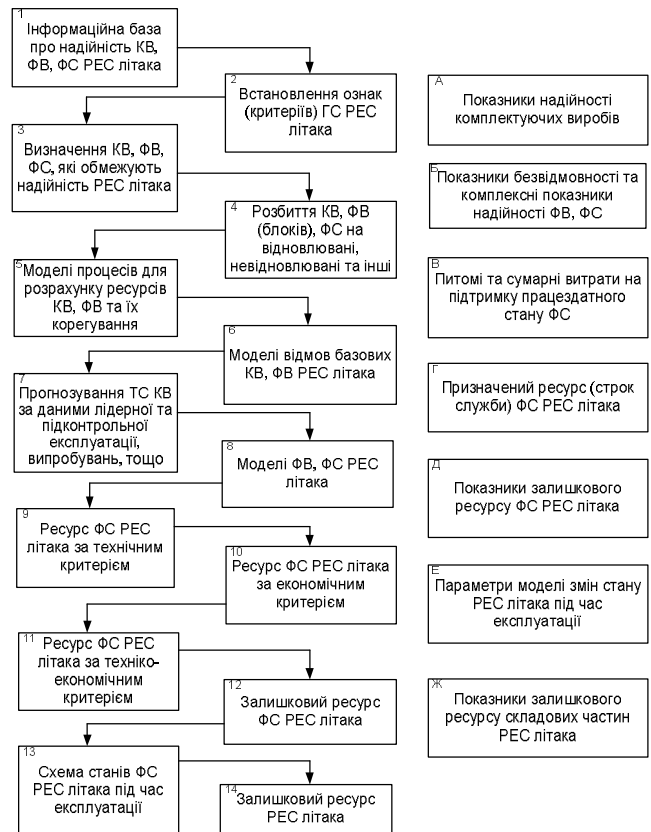


Рис. 2. Блок-схема розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака

Для розрахунку показників довговічності РЕС літака необхідно знати ознаки граничних станів (ГС). Встановлення чітких ознак граничних станів РЕС літака (блок 2) - обов'язковий елемент не тільки методики розрахунку показників залишкового ресурсу, але і експлуатації літака.

Аналіз даних експлуатаційної надійності РЕС літака показує, що у кожного літака в певних умовах експлуатації при фіксованому напруженні є обмежене число КВ, які частіше за інших відмовляють. Саме ці вироби, в основному, визначають матеріальні та трудові витрати на підтримку літака в працездатному стані. Такі елементи отримали назву "обмежуючих надійність", або критичних по надійності. Із загальної кількості КВ РЕС літака близько 6% (до 10%) мають терміни служби менше, ніж літак, але тільки близько 0,5% (до 1%) з них є критичними по надійності.



Виявлення КВ, "обмежуючих надійність" (блок 3), має принципове значення для вдосконалення методів розрахунку надійності, зокрема, показників ЗР, з наступних причин:

- дозволяє скоротити обсяг обчислень і випробувань;

- при малих обсягах випробувань, невизначеності апріорних даних про ресурси всіх КВ, ФВ РЕС літака дозволяє забезпечити прийнятну точність розрахунків і оцінок показників залишкового ресурсу.

Розрахунки показників довговічності доцільно проводити з урахуванням проведених відновлень, технічних обслуговувань, поточних ремонтів РЕС літака. У зв'язку з цим необхідне розбиття КВ, ФВ (блоків), ФС РЕС літака на відновлювані об'єкти з повними, мінімальними або неповними відновленнями, контрольовані періодично або (та) у безперервний спосіб, і невідновлювані об'єкти (блок 4).

Далі для відомого розбиття КВ, ФВ (блоків) на відновлювані і невідновлювані об'єкти необхідне застосування відомих моделей надійності, або розробка нових і їх коригування на початок робіт з продовження ресурсів (блок 5).

Відомі розрахункові математичні моделі дозволяють визначити показники надійності в одному з елементів КВ або виробу в цілому, якщо комплектуючий виріб відмовляє через один деградаційний процес. Однак, для більшості КВ, ФВ характерний перебіг декількох типів деградаційних процесів, що призводять до відмови. У цих випадках спроби розрахувати ресурс КВ, виділивши тільки один з деградаційних процесів, як правило, не дають позитивних результатів. Удосконалення методів розрахунку ресурсу КВ можливе на основі аналізу причинно-наслідкових передумов і провісників відмов і подальшій розробці моделі відмов (блок 6).

Аналіз результатів спостережень за відмовами елементів, КВ в експлуатації і можливих схем виникнення відмов елементів, показує, що в основу моделей відмов елементів, КВ можуть бути покладені такі типи залежностей між деградаційними процесами:

- деградаційні процеси, що протікають в різних елементах комплектуючих виробів, призводять до виникнення незалежних відмов;

- деградаційні процеси  $\xi_i(t)$ , що не приводять до відмови комплектуючих виробів при досягненні граничних станів, є причинами виникнення інших процесів  $\eta_i(t)$ , які призводять до відмов;

- деградаційні процеси, що призводять до відмов, розвиваються в залежності від того, чи досягають певного стану інші деградаційні процеси, що не приводять до відмов.

На підставі вищевикладеного можна сформулювати основні етапи методики розрахунку ресурсу КВ РЕС літака:

- виявлення КВ (або так званих "схемних позицій"), які повинні піддаватися розрахунку на довговічність. Збір інформації про їх надійності;

- розбиття комплектуючих виробів на невідновлювані та відновлювані із зазначенням глибини відновлення;

- визначення переважаючих видів деградаційних процесів, вибір відповідних розрахункових моделей;

- визначення вихідних даних для розрахунку показників довговічності комплектуючих елементів, комплектуючих виробів;

- формування моделей ресурсу КВ, оцінка показників ресурсу КВ, їх коригування за даними лідерної та підконтрольної експлуатації, а також за результатами технічних оглядів після вироблення призначеного ресурсу і (або) досягнення призначеного терміну служби. Крім цього при проведенні розрахунків повинні використовуватися моделі базових (основних) КВ, ФВ, ФС РЕС літака (блоків), їх несучих конструкцій, струмопровідних елементів.

При цьому до числа базових необхідно відносити вузли, що визначають ресурсні відмови, в тому числі струмопровідні елементи, несучі конструкції, захисні покриття та ін. Для розрахунків показників довговічності ФВ і ФС РЕС літака використовують відомі або розробляють нові моделі відмов (блок 8).

Розглянемо тепер наступні етапи пропонованої схеми розрахунку показників ЗР РЕС літака. Згідно блок-схеми розрахунку (рис. 2) наступний етап полягає в прогнозуванні потоку відмов КВ, ФВ, ФС РЕС літака (блоки 7, 8). При прогнозуванні потоку відмов ФВ, ФС (блок 8) повинні враховуватися основні особливості формування експлуатаційного потоку відмов і відновлень КВ РЕС літака. Дані особливості обумовлені різними рівнями їх безвідмовності, проведеними при експлуатації відновленнями різної глибини (повними, неповними і мінімальними), кінцевим числом відновлень певних схемних позицій РЕС літака, наявність усічених потоків відмов, обумовлених проведеними капітальним, середнім ремонтом; необхідністю врахування віку КВ і ін. Важливим при прогнозуванні технічного стану КВ є використання крім даних підконтрольної і лідерної експлуатації літака результатів проведення випробувань з лідерними виробами, які виробили певні ресурси або досягли призначених термінів служби.

Наступні етапи розрахунку – визначення ресурсу ФС РЕС літака за технічним (блок 9) і економічним (блок 10) критеріями. Для реалізації цього етапу проводяться розрахунки параметра потоку відмов, нестационарного коефіцієнта готовності, і, крім цього, розрахунки витрат на поточні ремонти, технічне обслуговування (ТО) (питомі, сумарні витрати та ін.) (Блок В).

Для знаходження ресурсу ФС РЕС літака з технічного критерієм можуть використовуватися такі показники: параметр потоку відмов  $\omega_{ci}(t)$ , нестационарний коефіцієнт готовності, або інші показники граничного стану. При цьому під ресурсом РЕС літака за технічним критерієм розуміється сумарне напруження до моменту часу, коли значення параметра потоку відмов  $\omega_{ci}(t)$  (або нестационарного коефіцієнта оперативної готовності  $K_{e\,ci}(t, t_{\text{оп}})$ ) досягне гранично допустимої величини  $\omega_{\text{нпм}\,i}(t)$  (або знизиться до гранично допустимої величини  $K_{\text{дон}\,i}(t)$ ).

Під ресурсом РЕС літака за економічним критерієм розуміється такий ресурс, при якому досягається мінімум питомих витрат на набуття та підтримання РЕС в працездатному стані, тобто мінімум функції

$$C(t) = \frac{C_{\Sigma}(t)}{t}, \quad (1)$$

де  $C_{\Sigma}(t)$  – сумарні витрати на покупку і технічну експлуатацію РЕС літака за напрацювання  $t$ .

Основна складова частина літака, або окремі ФС РЕС літака підлягають ремонту, якщо її базові (основні) частини підлягають ремонту (або заміні), що вимагає розбирання ФС, причому працездатність ФС, або РЕС літака в цілому не може бути відновлена поточним ремонтом, або її відновлення поточним ремонтом економічно недоцільне. Отже, критерій досягнення граничного стану ФС РЕС літака і РЕС літака в цілому є техніко-економічним (блок 11), тобто випадкову величину ресурсу до граничного стану можна записати у вигляді

$$R = \min(R_m, R_e), \quad (2)$$

де  $R_m, R_e$  – випадкові ресурси ФС за технічним та економічним критеріями.

З (2) випливає, що функцію розподілу ресурсу  $i$ -ї ФС  $F_{ci}(R)$  можна знайти на основі відомих функцій розподілу ресурсів за технічним  $F_{mi}(R)$  та економічним  $F_{ei}(R)$  критеріями:

$$F_{ci}(R) = 1 - [1 - F_{mi}(R)][1 - F_{ei}(R)].$$

При розрахунку витрат можна виділити питомі (диференціальні) і сумарні витрати на підтримку працездатності і заданого рівня надійності ФС РЕС літака. Змінні витрати на поточний ремонт ФС включають витрати на запасні елементи, трудові витрати і матеріали і можуть бути представлені у вигляді питомих (диференціальних)  $\tilde{N}_o(t)$  або сумарних  $C_{\Sigma}(t)$  витрат:

$$\begin{aligned} C_{\delta i}(t) &= K_i \sum_{j=1}^{N_i} \omega_{ji}(t) C_j, \\ C_{\Sigma}(t) &= \sum_{i=1}^M C_{\delta i}(t) \Delta t, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\omega_{ji}(t)$  – параметр потоку відмов  $j$ -го КВ на інтервалі напрацювання  $(t, t + \Delta t)$ ;  $C_j$  – оптова ціна  $j$ -го КВ;  $N_i$  – кількість КВ, що лімітують надійність  $i$ -ї ФС;  $K_i$  – коефіцієнт, що враховує співвідношення між витратами на запасні елементи і іншими витратами при поточному ремонті (трудова витрати, матеріали, витрата ресурсу ФС на поточний ремонт).

Уточнимо поняття питомих і диференціальних витрат, які визначаються в результаті поділу витрат

на напрацювання РЕС і мають однакову розмірність. Якщо розподіл витрат проводиться на інтервал напрацювання РЕС літака, то такі витрати слід вважати диференціальними. Зауважимо, що диференціальні витрати можуть бути отримані на підставі диференціальних залежностей, наприклад, за допомогою параметра потоку відмов. Якщо розподіл витрат проводиться на сумарне напрацювання РЕС, то витрати будемо відносити до питомих. Диференціальні і питомі витрати тотожні тільки в разі лінійної залежності цього показника. Співвідношення (1) для питомих витрат ФС можна представити через диференціальні витрати

$$C_i(t) = \frac{C_{0i} + \int_0^t C_{\delta i}(\tau) d\tau}{t},$$

де  $C_{0i}$  – ціна  $i$ -ї ФС.

За техніко-економічним критерієм розраховуються (і коригуються в процесі експлуатації) призначені терміни служби (ресурс) ФС РЕС літака і РЕС літака в цілому (блок Г). Далі при встановлених величинах призначених ресурсів (або термінів служби) ФС розраховуються показники залишкових ресурсів ФС, ФВ, блоків РЕС літака (блок 12). Найповнішою характеристикою ЗР є функція розподілу ЗР; найбільш часто проводяться розрахунки середнього ЗР, рідше – середнього квадратичного відхилення ЗР, для високо відповідальних виробів рекомендується розраховувати гамма-процентний ЗР (блок Д). Більш детально показники ЗР і основні розрахункові співвідношення розглянуті в розділі 3.

Після розрахунку показників ЗР ФС будується нова або розглядається відома ймовірна схема станів РЕС літака в експлуатації (блок 13), стосовно якої проводиться розрахунок показників ЗР РЕС літака.

Нижче більш докладно розглядаються окремі фрагменти в представленій схемі розрахунку (рис. 2) показників залишкового ресурсу РЕС літака, які або не розглядаються в науково-технічній літературі, або не розроблені досить повно для проведення розрахунків показників ЗР.

**2. Загальні положення щодо оцінки технічного стану РЕС літака і обґрунтування ознак граничних станів для вирішення завдань продовження ресурсів (термінів служби).** Рішення задач експлуатації РЕС літака, в тому числі завдань продовження ресурсу, пов'язане з необхідністю визначення таких технічних і граничних станів: справний, працездатний і неграничний, непрацездатний і неграничний, граничний.

Для підтримки працездатності РЕС літака і заданого рівня надійності необхідно на місцях експлуатації визначати не тільки справність або працездатність об'єкта, але і можливість його експлуатації на заданому інтервалі (наприклад, інтервалі продовження). Рішення задач продовження ресурсів вимагає деталізації граничних станів РЕС літака. Вважається за доцільне для вирішення завдань продовження ресурсів визначати наступні види граничних станів (ГС):

– граничний стан 1 (ГС1) – непрацездатний або працездатний виріб з неприпустимим зниженням

ефективності експлуатації. Ремонт силами і засобами експлуатуючої організації неможливий, можливе відновлення працездатності та ресурсу на місцях експлуатації із залученням виїзних ремонтних бригад ремонтних підприємств. Трудомісткість ремонту визначається обмеженим обсягом заміни блоків, вузлів, які швидко зношуються, та порівнянню з сумарною трудомісткістю ТО і ремонту за 1 рік експлуатації. При цьому запас ресурсу виробу після ремонту забезпечує продовження експлуатації на 3-5 років;

– граничний стан 2 (ГС2) – непрацездатний або працездатний, але граничний стан виробу, для відновлення ресурсу якого необхідне часткове розбирання окремих функціональних систем, блоків, їх діагностування та відновлення. Трудомісткість і технологія виконання ремонтних робіт вказує на доцільність середнього ремонту в умовах ремонтного підприємства;

– граничний стан 3 (ГС3) – непрацездатний або працездатний, але граничний стан виробу, який виробив призначені терміни служби. Для відновлення ресурсу необхідна повне розбирання функціональних систем, блоків, їх діагностування та відновлення. Трудомісткість і технологія виконання ремонтних робіт показують на доцільність капітального ремонту в умовах ремонтного підприємства.

Відзначимо, що для станів ГС2 і ГС3 в разі виконання відповідного середнього і капітального ремонту забезпечується продовження експлуатації на термін не менше 5 років.

– граничний стан 4 (ГС4) – виріб виробив призначені терміни служби, кількість середніх і капітальних ремонтів перевищує встановлену, виконання середнього або капітального ремонту економічно не доцільне. Виріб підлягає списанню.

Для визначення таких видів ГС необхідна розробка відповідних контролів технічних (КТС) і граничних станів (КГС). Реалізація таких контролів дозволила б ефективно вирішувати завдання продовження ресурсів РЕС літака в експлуатуючих організаціях, зокрема, завдання планування експлуатації і ремонту літака. Нижче обґрунтовуються ознаки граничних станів РЕС літака, необхідні для вирішення завдань розрахунку показників ЗР. Завдання розробки відповідних контролів граничних станів ГС1 ... ГС4 тут не розглядається.

Важливим завданням при розробці методики КТС і КГС РЕС літака для вирішення завдань продовження ресурсу є формування сукупності ознак, що характеризують зміну технічного стану в процесі експлуатації під впливом різних факторів (рис. 3).

До них відноситься система функціонального використання літака, система ТО і ремонту, кліматичні чинники і механічні дії, часові і конструктивно-технологічні чинники. В свою чергу, вплив системи функціонального використання визначається (див. рис. 3) режимами експлуатації літака, а саме: тривалістю використання за призначенням, тривалістю очікування використання за призначенням, тривалістю зберігання, технологічного обслуговування та іншими операціями використання за призначен-

ням. Експлуатаційна документація літака регламентує режим експлуатації, операції використання за призначенням, кваліфікацію екіпажу і т.д.

Вплив системи ТО і ремонту визначається (рис. 3) передбаченою відповідно до інструкції по експлуатації сукупністю робіт по ТО і ремонту, виконавцями і засобами ТО і ремонту на різних етапах експлуатації літака, механізмом функціонування системи ТО і ремонту.

У зв'язку з різноманітністю чинників, що впливають на стан РЕС літака, неоднорідністю механізмів відмов КВ, ФВ, ФС, блоків і складових частин оцінку технічного і граничного станів РЕС доцільно проводити по векторному показнику. Компоненти такого вектора повинні характеризувати зміни, що відбуваються в складових частинах РЕС літака в процесі експлуатації під впливом наведених факторів (рис. 3), і бути пристосованими до контролювання заданими засобами контролю. При вирішенні завдань продовження ресурсів обов'язковою компонентою цього вектора повинні бути показник безвідмовності або комплексний показник надійності. При формуванні компонента вектора, що характеризує стан РЕС літака, слід враховувати, що ТС об'єкта визначається станом КВ, ФВ, ФС, блоків, і складових частин РЕС літака.

Для оцінки технічного та граничного станів КВ виділяють так звані однорідні групи елементів: ТЕ-Зи, вироби електронної техніки, електрорадіовироби, електромеханічні вузли, субблоки, блоки, що входять до складу різних ФВ і ФС РЕС літака. Зібрана інформація про результати їх випробувань і експлуатації використовується для аналізу надійності виробів.

Важливим з точки зору ефективного використання цих даних є можливість використання інформації про результати випробувань і експлуатації різних пристроїв, що містять загальні КЕ і вузли.

Технічний стан вузлів, субблоків, блоків РЕС літака визначається станом власне КВ (елементів), захисних елементів (корпус, кріплення, плати, вібропоглиначі, вологопоглиначі і ін.), струмопровідних елементів (доріжки плат, дроти, тощо). Тому оцінку ТС вузлів, субблоків, блоків і показників надійності необхідно здійснювати, вважаючи, що в їх склад нарівні з КВ входять струмопровідні і захисні елементи.

Технічний стан РЕС літака залежить, зокрема, від стану кабельної мережі літака, кабелів і проводів. До кабельних виробів відносяться: силові кабелі, кабелі зв'язку, кабелі управління, дроти намотувальні, радіочастотні кабелі та проводи з гумовою, пластмасовою і іншими видами ізоляції. Термін служби кабельних виробів в значній мірі визначається зовнішніми факторами, величина їх терміну служби для РЕС літака становить 5,5-12 років.

Технічний і граничний стан РЕС літака визначається також станом механічних і електромеханічних вузлів і пристроїв (в основному механічних редукторів обертання). Технічний стан цих вузлів і пристроїв багато в чому залежить від регулярності та якості ТО.

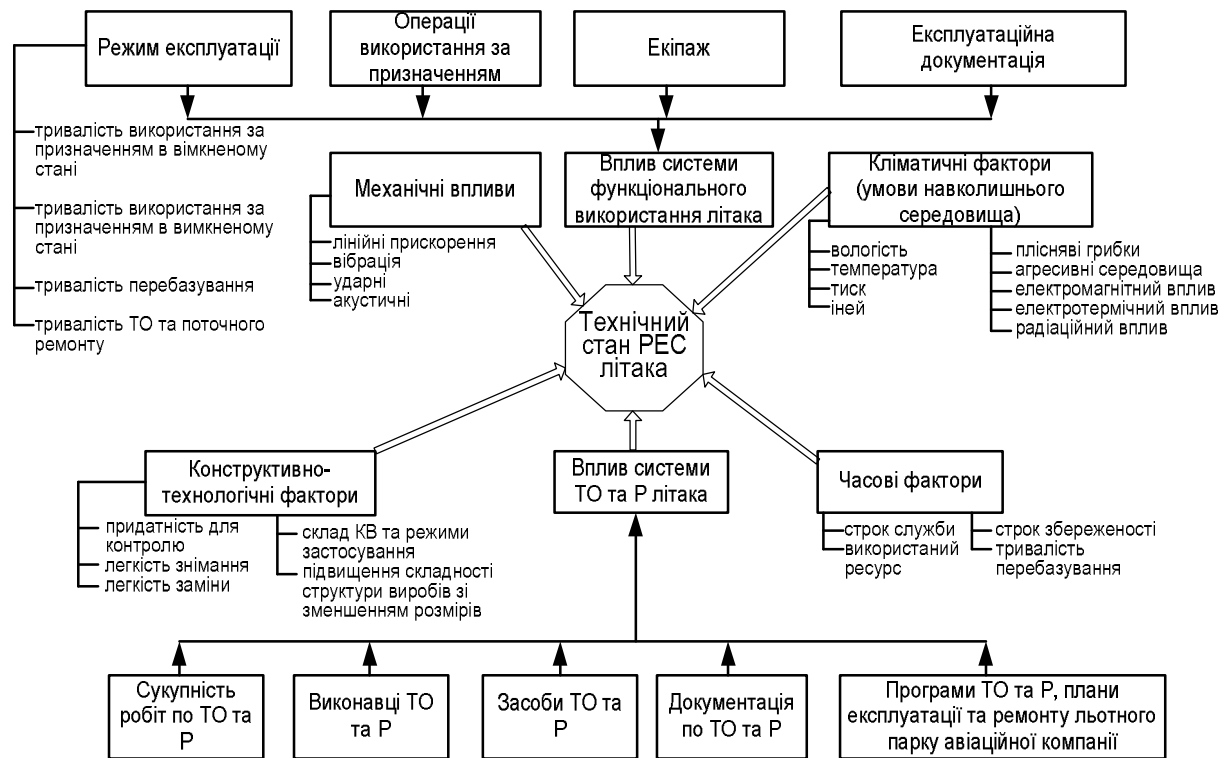


Рис. 3. Фактори, що впливають на технічний стан РЕС літака

Відзначимо, що граничного стану РЕС літака може досягти через низьку довговічність матеріалів. Недостатня стійкість полімерних матеріалів до старіння має, як правило, негативні наслідки в разі їх сусідства з металами. При цьому в більшості випадків активізуються корозійні процеси. Важливим для процесу старіння полімерів є біологічний фактор. Слід зазначити, що на відміну від металів, полімерні матеріали руйнуються під зовнішнім впливом не тільки по поверхні, але і за об'ємом виробу.

Стан перерахованих компонент необхідно відобразити в системі показників технічних і граничних станів РЕС літака.

Серед названих складових компонент вектора ГС обов'язковими складовими повинні бути показники надійності КВ, ФВ, пристроїв, ФС, складових частин і РЕС літака в цілому. Залежно від різновиду аналізованого об'єкта (відновлюваний, невідновлюваний, той що обслуговується і т.д.) доцільно використовувати відповідні показники безвідмовності і комплексні показники надійності.

З вище наведеного випливає, що контроль ТС і ГС РЕС літака доцільно здійснювати за сукупністю показників, що відображають стан КІ, ФВ, блоків, кабельних виробів, матеріалів, їх показників надійності. Крім цього, необхідно цю сукупність показників ТС і ГС доповнити показниками, що характеризують стан допоміжних пристроїв і устаткування: комплектів запасних елементів і запасних частин, експлуатаційної документації.

На множині сформованих показників ТС і ГС РЕС літака необхідно побудувати простір ознак цих станів в певній метриці, наприклад, евклідовій. Далі в просторі виділених ознак необхідно буде вирішувати задачу класифікації фактичного стану РЕС лі-

така за видами ТС і ГС. Для цього попередньо необхідно множини всіх можливих ТС і ГС розбити на підмножини, які відповідають різним видам ТС і ГС.

Для вирішення завдань продовження ресурсу РЕС літака доцільно до встановлених в експлуатаційній документації видів ТЗ (справний, несправний і працездатний) додати граничні стани ГС1, ГС2, ГС3, ГС4. При цьому граничні значення показників ТС і ГС визначаються:

– технічним станом РЕС літака, обсягом робіт з розбирання ФС, ФВ і т.д.;

– технічними можливостями усунення дефектів і відмов в умовах експлуатації з використанням штатних засобів ТО і поточного ремонту, що додаються до літака;

– очікуваною трудомісткістю і вартістю виконання робіт, а також очікуваною тривалістю виведення літака зі стану готовності до експлуатації.

Для класифікації станів  $S$  РЕС літака доцільно виділити відповідні підмножини станів  $S(\Pi_i)$ , для яких виконується умова:

$$\bigcup_{i=0}^4 S(\Pi_i) = S; \quad \prod_{i=0}^4 S(\Pi_i) = \emptyset,$$

де  $S(\Pi_i) - GC_i$ , причому неграничний стан позначено  $S(\Pi_0)$ .

Необхідна розробка методики оцінки технічних і граничних станів, що дозволяють за результатами контролів технічного стану на основі векторного показника віднести фактичний стан РЕС літака до одного з видів станів  $S(\Pi_i), i = 0, 4$ .

Сформована множина показників ТС і ГС, а також виділені ознаки станів дозволяють проводити

розрахунки показників залишкового ресурсу РЕС літака.

При розрахунках і оцінках показників ЗР важливо враховувати всі параметри стану РЕС літака. Граничні стани РЕС літака визначаються сукупністю технічних характеристик, які включають в себе кількісні показники (показники надійності, що характеризуються залежністю параметра потоку відмов  $\omega(t)$  від напрацювання, або коефіцієнта готовності  $K_z(t)$ , показники параметричної надійності) і якісні показники, що характеризують стан матеріалів, конструкцій та ін.

Визначення напрацювання до ресурсної відмови є завданням прогнозування ресурсу РЕС літака. Прогнозування ресурсу за кількісними показниками можна проводити розрахунково-експериментальним методом, зокрема, по параметру потоку відмов, коефіцієнту готовності та показниками параметричної надійності.

Прогнозування ТС за показниками параметричної надійності має ґрунтуватися на даних вимірів ВП ФС і ФВ РЕС літака і їх регулюванні в процесі періодичних ТО. Для вирішення завдання продовження ресурсів доцільно мати моделі зміни ВП, що подаються у вигляді випадкових процесів і засновані на періодичних вимірах їх реалізацій. Такі статистичні моделі дозволяють знаходити точкові і інтервальні оцінки параметричної надійності РЕС літака за результатами періодичних вимірювань ВП.

**3. Загальні положення по розрахунку параметра потоку відмов комплектуючих виробів і функціональних вузлів РЕС літака** Відповідно до викладеної вище блок-схеми розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака необхідно розраховувати параметри потоку відмов КВ, ФВ РЕС літака.

Відомі аналітичні методи розрахунку параметра потоку відмов РЕС літака і складних технічних систем засновані на побудові математичних моделей потоків відмов груп однорідних елементів з подальшим розрахунком параметра потоку відмов РЕС літака у вигляді суми:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^M n_i \omega_i(t), \quad (4)$$

де  $M$  – кількість типів груп однорідних елементів в РЕС літака;  $n_i$  – кількість елементів  $i$ -го типу в РЕС літака;  $\omega_i(t)$  – параметр потоку відмов елемента  $i$ -го типу.

Розрахунок параметра потоку відмов  $\omega_i(t)$  відбувається, як відомо, з використанням рівняння Вольєрра

$$\omega_i(t) = f_i(t) + \int_0^t f_i(t-u) \omega(u) du, \quad (5)$$

де  $f_i(t)$  – щільність розподілу напрацювання до відмови елементів  $i$ -го типу на певній схемній позиції в РЕС літака.

При розрахунках прийняті такі допущення:

- число відновлень елемента на певній схемній позиції за доремонтний або міжремонтний термін служби РЕС літака є нескінченно велика величина;
- відновлення ресурсу елемента повне, тобто розглядається модель повних відновлень;
- сумарні напрацювання різних ФС РЕС літака до моменту проведення планових робіт (щодо продовження ресурсів, ремонту і т.п.) є однаковими і детермінованими;
- параметр потоку відмов РЕС літака розраховується шляхом підсумовування параметрів потоку відмов різнорідних груп КВ, які можуть істотно відрізнятися за рівнем безвідмовності.

Перераховані допущення, як правило, спрощують розрахунки, знижують їх трудомісткість, проте в більшості випадків істотно знижують їх точність.

Процес відмов і відновлень КВ певних схемних позицій РЕС літака представляють потоком відмов і відновлень, вивченню яких присвячена теорія відновлень. Найбільшого поширення в практиці розрахунків отримали два типи відновлень: "простий", при якому всі функції розподілу напрацювань до першого  $F_i(t)$  і між наступними відмовами однакові; і "загальний", при якому всі функції розподілу однакові, крім першої, тобто  $F_{i,i+1}(t) \neq F_1$ ,  $i = 1, 2, \dots$ .

Реальні процеси відновлень РЕС літака характеризуються істотно більшою розмаїтістю потоків відмов і відновлень, пов'язаних з проведеними в процесі експлуатації РЕС різними видами відновлень КВ (повними, мінімальними і неповними), кінцевим числом відновлень і т.д. Так, в РЕС літака для відновлення ФС використовуються ТЕЗи, інші КВ, які в процесі їх зберігання в комплектах ЗІП до моменту установки можуть втратити частину свого ресурсу. Крім того, ТЕЗи можуть бути відновлюваними елементами, що характерно для КВ 3-го покоління (та вище), які, природно, до моменту їх установки в апаратуру після чергового відновлення мають певну величину витраченого ресурсу. Згідно з нормативно-технічною документацією допускається поставляти КВ, вироби електронної техніки, електротехніки, які пройшли випробування на безвідмовність, якщо тривалість випробувань не перевищує 20% їх гарантійного напрацювання.

У зв'язку з цим великий інтерес представляє (крім відомих в теорії відновлень простих і загальних процесів повних відновлень) розгляд процесу відновлень з різними функціями розподілу напрацювань між відмовами, який назовемо складним процесом відновлень. Складний процес відновлень характерний для неповних і мінімальних відновлень, коли параметри ресурсів КВ до першого разу (заміни) і наступними відмовами розрізняються. Ці параметри для складного процесу відновлень можуть бути отримані на основі обробки ретроспективної інформації, наприклад, шляхом отримання за результатами статистичної обробки даних лідерної експлуатації РЕС літака кореляційних залежностей. Так, зменшення середніх напрацювань КВ після заміни можна обґрунтувати за допомогою моде-

лей ресурсів КВ, і розгляду середніх напрацювань КВ до першої відмови, між 1-м і 2-м відмовами, 2-м і 3-м і т.д.

Розрахунок доцільно проводити для лінійної залежності, а коефіцієнти кореляційних залежностей визначати методом найменших квадратів.

Інший спосіб обліку змін в безвідмовності ФС РЕС літака заснований на обліку віку відновлюваного КВ на певній схемній позиції ФС або РЕС літака.

Аналіз робіт з визначення показників довговічності РЕС літака, зокрема призначених термінів служби до ремонту, заснований на застосуванні співвідношення (4). Точність наближення сумарного потоку відмов моделлю нестационарного пуассоновського потоку залежить від числа елементів, відмінності законів розподілу часу безвідмовної роботи окремих елементів від експоненціального і очікуваного числа відмов. Щоб відміна індивідуальних законів розподілу мало впливала на форму потоку раптових відмов, необхідне виконання співвідношення:

$$n_i/M[n] > 10(\lambda_0/\lambda - 1), \text{ при } M[n] > 1, \quad (6)$$

де  $M[n]$  – математичне сподівання числа відмов на розглянутому інтервалі часу;  $\lambda_0$  – значення інтенсивності відмов в початковий момент часу (на початку періоду напрацювання);  $\lambda$  – сталі значення інтенсивності відмов.

Сенс наведеної нерівності полягає в наступному. При малих значеннях відношення  $n_i/M[n]$  кожен елемент може відмовити кілька разів і закон розподілу числа відмов сумарного потоку буде в значній мірі визначатися індивідуальними законами розподілу напрацювань між відмовами елементів. При великих значеннях відносини  $n_i/M[n]$  кількість відмов кожного елемента в загальному потоці невелика і тому індивідуальні закони розподілу елементів не впливають на закон розподілу числа відмов в сумарному потоці.

Все сказане відноситься більшою мірою і до поступових відмов. Відмінності полягають в тому, що потік поступових відмов елементів ФВ або навіть ФС можна розглядати як суму потоків відмов великого числа елементів.

Крім цього, співвідношення (4) має місце для відновлюваних виробів з послідовною структурною схемою надійності (ССН) за умови, що його КЕ функціонують незалежно і, в разі відмови окремого КЕ, інші продовжують функціонувати, при цьому потік відмов КЕ є ординарним потоком без післядії або з обмеженим післядією, сумарні напрацювання

КЕ виробу однакові (або тривалість відновлення дорівнює нулю). У розроблених методиках розрахунку показників залишкового ресурсу пропонується використовувати розрахункове співвідношення (4) тільки для знаходження параметра потоку відмов КВ, які відповідають вищезгаданим умовам і є елементами послідовної ССН.

При цьому результати оцінки параметра потоку відмов використовуються для розрахунку нестационарного коефіцієнта готовності або коефіцієнта оперативної готовності КВ, ФВ, блоків, до складу яких входять дані КВ.

Нижче розглядаються математичні моделі потоку відмов КВ РЕС літака, орієнтовані на їх використання при розрахунках показників залишкового ресурсу і вільні від сформульованих вище припущень. Наводиться узагальнення відомих моделей потоків відмов з урахуванням специфіки функціонування РЕС літака. При цьому багато відомих моделей можна розглядати як окремі випадки узагальнених.

## Висновки

1. Розроблені загальні положення по розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака, що включають ієрархічну схему розрахунку типу дерево: "РЕС літака – ФС – ФВ (блок) – КВ", процедуру розбиття ФС, ФВ і КВ на невідновлювані та відновлювані об'єкти з повними, мінімальними або неповними відновленнями, контрольовані періодично і безперервно, або неконтрольовані і т.д.; процедуру розробки нових або використання відомих математичних моделей процесів відмов і відновлень для відповідних об'єктів, інші загальні положення.

2. Сформульовано загальні положення щодо оцінки технічного стану та обґрунтування ознак граничних станів РЕС літака для вирішення завдань продовження ресурсів. Показано, що оцінку граничних станів РЕС літака доцільно здійснювати за сукупністю показників, що відображають стан КВ ФВ, ФС, складових частин літака, кабельних виробів, матеріалів, допоміжних пристроїв, устаткування та їх показників надійності.

Цю сукупність показників необхідно враховувати при розрахунках і оцінках показників залишкового ресурсу. Виділена сукупність технічних характеристик і ознак граничних станів, що дозволяють вирішувати завдання розрахунку показників залишкового ресурсу.

3. Сформульовано загальні положення по розрахунку параметра потоку відмов КВ і ФВ РЕС літака, з розробки математичних моделей процесів їх відмов і відновлень для вирішення завдань продовження ресурсів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними : ДСТУ 3004-95. – [Чинний від 1995-01-25]. – К.: Держспроживстандарт України, 1995. – 51 с.
2. Бобало Ю.Я. Якість, надійність радіоелектронної апаратури: [монографія] / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселичник; за ред. Л.А. Недоступа. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. – 196 с.
3. Бобало Ю.Я. Аналіз методів оцінювання безвідмовності систем сумісно працюючих компонентів електронних пристроїв / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, О.В. Лазько // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 7 (26). – С. 212–214.

4. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытание на безотказность: пер. с англ. И.А.Ушакова, М.: Наука, 1985г.
5. Юрков Н.К. К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н.К. Юрков, И.И. Кочегаров, Д.Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 220-231.
6. Кучук Г.А. Розрахунок навантаження мультисервісної мережі / Г.А. Кучук, Я.Ю. Стасєва, О.О. Болубаш // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 4 (8). – С. 130 – 134.
7. Коваленко А. А. Подходы к синтезу технической структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2014. – № 1(38). – С. 116-119.
8. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
9. Кучук Г.А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка / ГА Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 5 (45). – С. 74-84.
10. 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.
11. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. Studies in Systems, Decision and Control, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, 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)
12. Гудков М. В. Методика прогнозування надійності радіоелектронного обладнання при експлуатації авіаційної техніки за станом з контролем параметрів / М.В. Гудков // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – № 4(24). – С. 32-35.
13. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
14. Сучасні методи прогнозування технічного стану авіаційної техніки / О. М. Добриденко, А. С. Бологін, М. Ф. Хільченко, Р.Б. Белінська // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. - 2011. - Вип. 7(14). - С. 163-167.
15. Кучук Г.А. Минимизация загрузки каналов связи вычислительной сети / Г.А. Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1998. – Вип. 1(5). – С. 149-154.
16. 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>
17. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209–213.
18. Коваленко А.А. Использование временных шкал при аппроксимации длины очередей компьютерных сетей / А.А. Коваленко, Г.А. Кучук, И.В. Рубан // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2018. – № 2 (4). – С. 12–18. – DOI: <http://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.012>
19. Кучук Г. А. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов беспроводных сетей / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 8(98). – С. 211-218.
20. Чернявський В. М. Застосування непараметричних методів для оцінки рівня надійності авіаційної техніки з низькою інтенсивністю експлуатації / В.М. Чернявський // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2012. – № 3(32). – С. 59-63.
21. Кучук, Г.А. Синтез стратифікованої інформаційної структури інтеграційної компоненти гетерогенної складової Єдиної АСУ Збройними Силами України / Г.А. Кучук, О.П. Давікоза // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: ХУ ПС, 2013. – № 3(12). – С. 154-158.
22. Каштанов В.А. Теория надежности сложных систем /В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – 2-е изд, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 608 с.
23. Козлов В.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Советское радио, 1985. – 462 с.

Received (Надійшла) 20.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.04.2020

#### Development of general provisions for calculating residual resource indicators radio electronic aircraft system

S. Haievskyi, S. Balakireva, I. Kulakov

**Abstract.** The **subject matter** of the article are the functioning processes of the electronic system of a modern aircraft, its components and functional units as an object for determining and calculating the residual resource. The **goal** is the analysis of the existing methodological apparatus used to calculate the indicators of the residual life of the aircraft electronic system and search for ways to improve it. The **tasks**: to develop general provisions for calculating the indicators of the residual life of the aircraft electronic system. Analyzed **methods** are: calculation and experimental methods for assessing reliability, residual life and failure flow of an aircraft electronic system. The following **results** were obtained: A tree-type hierarchical calculation scheme has been developed: "aircraft electronic system – functional system – functional unit (block) - component product" and the procedure for splitting the circuit positions into non-renewable and renewable objects. **Conclusions.** The general provisions are formulated for calculating the parameters of the flow of failures and assessing the technical condition of the radio-electronic system of the aircraft to solve the problems of extending resources.

**Keywords:** residual life, aircraft, indicator, service life extensions, electronic system, technical condition.

А. В. Колесник<sup>1</sup>, А. В. Бойко<sup>2</sup>, Т. Ю. Міщенко<sup>3</sup>, В. М. Руденко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Льотна академія НАУ, Кропивницький, Україна

<sup>2</sup> Військова частина А3544, Кіровоград, Україна

<sup>3</sup> Військова частина А2171, Одеса, Україна

<sup>4</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЗНАТЬ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ АВІАЦІЙНИМ ОПЕРАТОРОМ ПРИ ВИНИКНЕННІ ОСОБЛИВИХ ВИПАДКІВ В ПОЛЬОТІ

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є методи, що дозволяють вирішити проблему невизначеності в процесі побудови систем підтримки прийняття рішень авіадиспетчера при виникненні особливих випадків в польоті. **Метою** є аналіз і обґрунтування вибору математичного апарату для побудови СППР авіадиспетчера. **Завдання:** аналіз ряду відомих методів інтелектуального аналізу даних, а саме: еволюційних алгоритмів, нейронних мереж, нечіткої логіки та байєсівських мереж з точки зору доцільності їх застосування при побудови систем підтримки прийняття рішень авіадиспетчера управління повітряним рухом при виникненні особливих випадків в польоті. Використовуваними **методами** є: методи аналізу і синтезу складних інформаційних систем, методи імітаційно-статистичного моделювання. Отримано такі **результати**. В результаті проведеного аналізу було встановлено, для побудови моделі СППР авіадиспетчера найбільш ефективним є використання апарату байєсівських мереж, який представляє собою перспективний ймовірнісний інструментарій, що дозволяє моделювати складні ієрархічні статичні та динамічні системи. Це обумовлено тим, що на відміну від популярних на даний час моделей "чорних скриньок" байєсівська мережа дозволяє отримати зрозуміле пояснення одержаних висновків, має їх логічну інтерпретацію, надає можливість врахування невизначеностей параметричного, статичного і структурного характеру і, що є особливо важливим, ґрунтується на фундаментальних положеннях теорії ймовірностей, яка розроблялась не одне сторіччя. **Висновки.** Напрямоком подальших досліджень є побудова системи підтримки прийняття рішень авіадиспетчера з використанням байєсівських мереж і технології ймовірнісного програмування.

**Ключові слова:** СППР, авіадиспетчер, еволюційні алгоритми, нейронні мережі, нечітка логіка, байєсівська мережа.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Диспетчер управління повітряним рухом виконує найважливішу функцію безпосереднього впливу на роботу льотних екіпажів, безпеку та слушність руху їх повітряних суден. Збільшення інтенсивності та щільності повітряного руху, перевищення норм пропускної спроможності секторів управління повітряним рухом неминуче призводить до нестачі часу, потрібного авіадиспетчеру для всебічного аналізу повітряної обстановки та прийняття грамотних рішень [1]. Для забезпечення підтримки операторської діяльності, особливо при виникненні позаштатних польотних ситуацій, для якісного прогнозування та своєчасної видачі правильних рекомендацій застосовують системи підтримки прийняття рішень (СППР), що являють собою інтерактивні системи, які використовують обладнання, програмне забезпечення, дані, базу моделей і роботу оператора з метою підтримки всіх стадій прийняття рішень [2-4].

Особливістю задачі управління повітряним рухом є прийняття рішень в умовах завад, відсутності, нестачі або неточності інформації на поточний момент часу, тобто вона відноситься до класу задач, що слабо формалізуються. На даний момент існує ряд методів, що дозволяють вирішити проблему невизначеності, побудувати якісну модель СППР, отримати прийнятні прогнози і відповідні рішення.

**Мета статті** – обґрунтування вибору математичного апарату представлення знань для побудови СППР авіадиспетчера при виникненні особливих випадків в польоті.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання інтелектуальної підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах управління повітряним рухом з елементами штучного інтелекту розглядаються в роботі [5], забезпечення функціональної стійкості автоматизованих систем управління повітряним рухом в роботі [6]. Побудова СППР авіадиспетчера з використанням штучних нейронних мереж з програмним забезпеченням на основі візуальної системи програмування Delphi 5 з використанням технології BDE запропоновано в роботі [7]. Але питання підвищення ефективності підтримки діяльності авіаційного оператора при виникненні позаштатних ситуацій, потребують подальших досліджень.

### Основна частина

Найбільш поширеними видами невизначеності в процесі побудови математичних моделей процесів і об'єктів різної природи є структурні, статистичні і параметричні невизначеності, які призводять до ускладнення процесу аналізу даних і погіршують якість оцінок прогнозів та/або якості автоматизованого керування. Для того, щоб побудувати високоякісну модель та отримати прийнятну оцінку прогнозів та відповідних їм рішень або керуючих впливів необхідно мінімізувати вплив невизначеності. Це досягається шляхом використання їх математичного опису або введення експертних оцінок, які забезпечують урахування невизначеності у моделях. На даний час не існує універсальних процедур для врахування всіх видів невизначеності. Так, наприклад, фільтр Калмана дає можливість врахувати та мінімізувати вплив збурень станів та шумів вимірів і завдяки цьому,



отримати оптимальні оцінки стану досліджуваного процесу на фоні негативних випадкових впливів [2]. Це сприяє не тільки покращенню оцінок стану, але й підвищенню якості оцінок прогнозів стану динамічних систем і якості керування ними.

Значний вклад у подолання проблеми невизначеності надають методи інтелектуального аналізу даних, а саме: нейронні мережі, нечітка логіка, нейро-нечіткі системи, байєсівські мережі та інші моделі байєсівського типу, еволюційні методи, інформований (евристичний) пошук та дослідження просторів, спрямовані на розв'язання оптимізаційних задач, математичну логіку, дерева рішень тощо.

Проведемо аналіз ряду методів інтелектуального аналізу даних методів з точки зору доцільності їх застосування для побудови системи підтримки прийняття рішень авіадиспетчера при виникненні особливого випадку в польоті – відмові двигуна на повітряному судні в польоті.

*Еволюційні методи.* Класичні методи, що використовуються для прийняття рішень, основну частину яких складають методи оптимізації, не є інваріантними до розмірності і змісту області даних, структури і параметрів цільової функції. Для досягнення даної мети, були створені методи еволюційного (генетичного) моделювання, що базуються на ідеях і принципах природної еволюції. До еволюційних алгоритмів відносять такі [8-10]: **еволюційне програмування**, що орієнтоване на оптимізацію неперервних функцій без використання рекомбінацій; **еволюційні стратегії**, що орієнтовані на оптимізацію неперервних функцій з використанням рекомбінацій; **генетичні алгоритми**, що призначені для оптимізації функцій дискретних змінних, в них акцентується увага на рекомбінаціях геномів; **генетичне програмування**, що використовує еволюційний метод для оптимізації комп'ютерних програм.

Еволюційний пошук включає в себе групу багатомірних, стохастичних, евристичних методів оптимізації, що засновані на ідеї еволюції за допомогою природного відбору. Такі методи отримані шляхом узагальнення та наслідування таких властивостей природи в штучних системах як: природний відбір, пристосованість до змін навколишнього середовища, спадкоємність нащадками від батьків життєво важливих властивостей.

Формально еволюційні методи пошуку можна представити у вигляді наступної функції:

$$GM = GM(P_0, N, L, f, \Omega, \Psi, \Theta, T), \quad (1)$$

де  $P_0 = \{H_1^0, H_2^0, \dots, H_N^0\}$  - початкова популяція - множина рішень задачі, що подані у вигляді хромосом;  $H_j^0 = \{h_{j_1}^0, h_{j_2}^0, \dots, h_{j_{L_j}}^0\}$  -  $j$ -та хромосома популяції,  $P_0$  - набір значень незалежних змінних, поданих у вигляді генів;  $h_{ij}^0$  -  $i$ -й ген  $j$ -ї хромосоми популяції  $P_0$  - значення  $i$ -го оптимізованого параметру задачі, що входить в  $j$ -те рішення;  $N$  - кількість хромосом в популяції;  $f$  - цільова функція;  $\Omega$  - оператор відбору;  $T$  - критерій зупинки.

Кожний еволюційний алгоритм є ітераційним методом. На кожній ітерації метод працює не з одним рішенням, а з деякою множиною рішень (сукупністю хромосом). Нова множина рішень залежить лише від попередньої, в загальному випадку, є кращою за попередні. Серед переваг еволюційних методів слід зазначити наступні: відсутність обмежень, щодо вигляду цільової функції; здатність пошуку рішень у просторі великої розмірності; зрозумілість схеми і базових принципів еволюційних обчислень; інтеграція еволюційних обчислень з іншими парадигмами штучного інтелекту. Недоліками еволюційних методів є: достатньо висока обчислювальна трудомісткість; відсутність гарантії оптимальності отриманого рішення; відсутність чіткої відповіді на такі питання: якими є необхідні і достатні умови збіжності кожного з методів; наскільки інваріантними є еволюційні алгоритми по відношенню до вигляду структур і вигляду початкових даних; самоадаптація еволюційних алгоритмів; відносна невелика ефективність на заключних фазах моделювання еволюції.

*Нейронні мережі.* Перспективним підходом до організації обробки неявних форм подання знань є застосуванням штучних нейронних мереж, які будуються по принципу організації та функціонування біологічних нейронних мереж - мереж нервових клітин живого організму.

Нейронні мережі використовують для вирішення складних задач, що потребують аналітичних розрахунків, подібних до тих, що виконує мозок людини. Найбільш часто нейромережі використовують для вирішення наступних задач: розпізнавання образів, у якості яких можуть бути символи тексту, зображення, зразки звуків тощо; класифікація - розподіл даних за параметрами; прийняття рішень і управління; кластеризація, тобто розподіл множини вхідних сигналів на класи; прогнозування; апроксимація; стиснення даних і асоціативна пам'ять.

Штучна нейронна мережа - мережа простих елементів - нейронів, які отримують вхід, змінюють свій внутрішній стан (збудження) відповідно до цього входу, і виробляють вихід, залежний від входу та збудження. Така мережа утворюється з'єднанням виходів одних нейронів зі входами інших нейронів з утворенням зваженого орієнтованого графу.

Нейромережа складається з декількох шарів: вхідний, внутрішні (приховані) та вихідний шари. Внутрішніх шарів може бути декілька. В кожному шарі утримується декілька нейронів, які пов'язані між собою зв'язками - вагами.

В процесі функціонування штучна нейронна мережа формує вихідний сигнал  $Y$  у відповідності з вхідним сигналом  $X$ , реалізуючи деяку функцію  $z: Y = z(X)$ .

Якщо задана архітектура мережі, то вид функції  $z$  визначається значеннями нейронів (синаптичних вагів і зміщень) мережі. Приймемо за  $Z$  множину всіх можливих функцій  $z$ , які відповідають заданій архітектурі мережі.

Розв'язанням деякої задачі буде функція  $k$ .  $Y = k(X)$ , що задається парами входів-виходів

$(X_1, Y_1) \dots (X_n, Y_n)$ , для яких  $Y_j = k(X_j)$ , де  $j = 1 \dots N$ .  $E$  – функція помилки (функціонал якості), яка показує для кожної функції  $z$  ступінь наближення до  $k$ .

Для вирішення задачі з використанням нейромережі заданої архітектури треба побудувати функцію  $z \in Z$ , підібравши параметри нейронів таким чином, щоб функціонал якості перетворювався в оптимум для всіх пар  $(X_n, Y_n)$ .

Задача навчання нейромережі визначається сукупністю п'яти компонентів:  $\langle X, Y, k, Z, E \rangle$ . Навчання полягає в пошуку функції  $z$ , оптимальної за  $E$  і являє собою ітераційну процедуру, на кожному кроці якої відбувається зменшення помилки.

Функція  $E$  може мати довільний вигляд. Якщо обрана множина прикладів для навчання й засіб обчислення функції помилки, то навчання нейромережі зводиться до задачі багатовимірної оптимізації. При вирішенні даної задачі перевага віддається тим методам, які здатні навчити ШНС за невелику кількість кроків і потребують невеликого числа додаткових змінних. У порівнянні з традиційними методами перевагами нейронних мереж є такі [7, 10, 11]:

1. Рішення задач в умовах невизначеності. Нейронна мережа дозволяє вирішувати завдання з невідомими закономірностями і залежностями між вхідними та вихідними даними, завдяки здатності до навчання.

2. Стійкість до шумів у вхідних даних. Завдяки здатності нейронної мережі самостійно виявляти неінформативні для аналізу параметри та відсіювати їх, відпадає необхідність у попередньому аналізі вхідних даних.

3. Гнучкість структури нейронних мереж. Компоненти нейрокомп'ютерів - нейрони і зв'язки між ними - можна комбінувати різними способами.

4. Адаптація до змін навколишнього середовища. Чим вище адаптивні здібності системи, тим більш стійкою буде її робота в нестационарному середовищі.

5. Висока швидкодія. Вхідні дані обробляються багатьма нейронами одночасно, завдяки чому нейронні мережі вирішують завдання швидше, ніж більшість інших алгоритмів.

6. Відмовостійкість нейронних мереж. У випадку несприятливих змін умов нейромережа реагує лише незначним зниженням продуктивності, що обумовлено розподіленим характером зберігання інформації в нейронній мережі. На працездатність нейромережі істотно можуть вплинути тільки серйозні пошкодження структури.

Проте нейромережі мають і ряд недоліків, що обмежує їх використання для вирішення певного кола задач [7]:

1. Складність змістовної інтерпретації нейронних мереж. Нейронні мережі працюють як "чорна скринька", оскільки отриманий результат (навіть найточніший прогноз) ніяк не пояснюється. Проблеми інтерпретації призводять до зниження цінності отриманих результатів.

2. Трудомісткість і тривалість навчання. Для того щоб нейронна мережа могла коректно вирішувати поставлені завдання, потрібно провести її навчання на десятках мільйонів наборів вхідних даних.

3. Нездатність прийняття рішень в кілька етапів. Нейронна мережа не може вирішувати завдання, які вимагають послідовного виконання декількох кроків; вона здатна вирішувати завдання тільки "в один захід". Тому нейромережа не може, наприклад, довести математичну теорему.

4. Відповідь, що видається НМ, завжди є приблизною. Нейронні мережі не здатні давати точні і однозначні відповіді. Але завдання, в яких треба застосовувати НМ і одночасно отримувати точні відповіді, зустрічаються досить рідко.

*Нечітка логіка.* Методи нечіткої логіки при моделюванні технічних систем доцільно використовувати у таких випадках, коли об'єкти, що моделюються [9]: є складними для аналізу за допомогою загальноновідомих кількісних методів; джерела інформації інтерпретуються неточно, в якісному вигляді або невизначено (наприклад речення на природній мові).

Базовим поняттям нечіткої логіки є елементарне нечітке висловлювання, що представляє собою певне речення, щодо якого можна судити про його істинність чи хибність з деякою мірою впевненості.

Обробка нечіткої інформації здійснюється шляхом перетворення отриманих даних (наприклад від датчиків) в значення лінгвістичних змінних у спеціальному блоці, що має назву "фазифікатор". Потім реалізуються процедури нечіткого виводу на множині продукційних правил, що складають базу знань технічної системи.

Лінгвістичні змінні використовуються для кількісного представлення вхідних та вихідних змінних системи у вигляді нечітких множин (термів). Терми лінгвістичних змінних представляються у вигляді функцій приналежності різного вигляду.

На рис. 1, а, б, для прикладу, наведена лінгвістична змінна, представлена за допомогою термів ("низька", "середня", "висока") з трапецієподібною та гаусовою функціями приналежності.

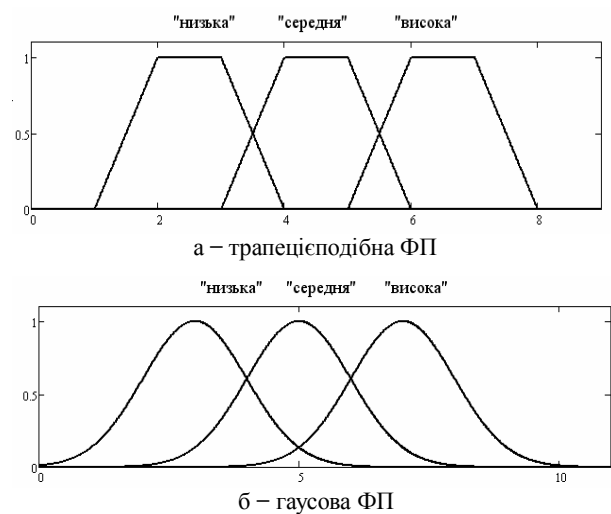


Рис. 1. Лінгвістична змінна з трапецієподібною та гаусовою функціями приналежності терм-множин

Трапецієподібна функція приналежності визначається як:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ 1, & b \leq x \leq c; \\ \frac{d-x}{d-b}, & b \leq x \leq d; \\ 0, & c \leq x, \end{cases} \quad (2)$$

де  $a, b, c, d$  - довільні числові параметри.

Гаусівська функція приналежності є такою:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right), \quad (3)$$

де  $b, c$  - довільні числові параметри.

В результаті виводу формуються нечіткі вихідні множини, які потім перетворюються в чіткі значення результатів у блоці, має назву "дефазифікатор". Процедури моделювання на основі нечіткої логіки характеризуються відносною прозорістю (простотою) та можливістю їх адаптації до процесів визначеного класу. До недоліків можна віднести необхідність генерування великої кількості правил при дослідженні багатовимірних процесів і неможливість стеження за їх використанням особою, що приймає рішення (ОПР) при формуванні остаточних висновків.

*Байєсівські мережі.* Одним з ефективних методів, що спрямовані на боротьбу з невизначеностями, є широкий клас методів моделювання, прогнозування і керування, які ґрунтуються на байєсівському підході [2]. Використання байєсівських мереж для аналізу процесів різної природи, діяльності людини та функціонування технічних систем дозволяє враховувати та використовувати експертні оцінки і статистичну інформацію.

Змінні, що використовуються у байєсівських мережах, можуть бути представлені у дискретному та неперервному вигляді, а за способом їх надходження вони можуть бути: в режимі реального часу, у вигляді статистичних масивів інформації та баз даних. Позначимо  $\Omega$  - множини подій (всі можливі значення випадкової змінної) випадкових експериментів. Якщо змінна отримала конкретне значення, говорять, що конкретна подія (спостереження) мала місце. Розглянемо дві події простору подій, що відповідають спостереженню та гіпотезі:  $E \in \Omega$  та  $H \in \Omega$  відповідно. Для обчислення ймовірності того, що подія  $E$  відбудеться за умови, що відбулась подія  $H$ , тобто умовної ймовірності  $P(E|H)$  використовують формулу Байєса:

$$P(E|H) = \frac{P(E \cap H)}{P(H)}. \quad (4)$$

Для події  $H$ :

$$P(H|E) = \frac{P(H \cap E)}{P(E)}. \quad (5)$$

Враховуючи властивість комутативності сукупної ймовірності можна записати правило Байєса:

$$P(H|E) = \frac{P(E|H) \cdot P(H)}{P(E)} \quad (6)$$

Ймовірності у чисельнику (6) є апіорними (задані до початку спостережень), у знаменнику – апостеріорними. Даний вираз демонструє причинно-наслідковий зв'язок між спостереженням і гіпотезою. За умови, що події є вичерпними і не перетинаються, тобто  $\bigcup_{i=1}^n H_i = \Omega$ , ймовірність події  $E$  можна обчислити за допомогою умовних ймовірностей:

$$P(E) = \sum_{i=1}^n P(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n P(E|H_i) \cdot P(H_i). \quad (7)$$

Підставимо даний вираз в (6) і отримаємо наступний вираз, що є основою для побудови мереж Байєса:

$$P(H_k|E) = \frac{P(E|H_k) \cdot P(H_k)}{\sum_{i=1}^n P(E|H_i) \cdot P(H_i)}, \quad (8)$$

де  $H_k$  - будь яка гіпотеза з  $n$  можливих.

Байєсівська мережа – це графова ймовірнісна модель, що має множини змінних і їх ймовірностей по Байєсу. Формально, байєсівська мережа визначається як пара  $\langle G, B \rangle$ . Перша складова –  $G$ , це направлений ациклічний граф, що відповідає змінним процесу, що досліджується і будується у вигляді причинно-наслідкової мережі. Друга складова –  $B$ , множина параметрів, що визначають мережу і містять параметри:  $\Theta_{X^i \setminus \text{par}(X^i)} = P(X^i | \text{par}(X^i))$  для кожного можливого значення  $x^{(i)} \in X^{(i)}$  та  $\text{par}(X^{(i)}) \in \text{Par}(X^{(i)})$ , де  $\text{Par}(X^{(i)})$  – набір батьків (parents) змінної  $X^{(i)} \in G$ , кожна з яких представляється у вигляді вершини [2]. Повна спільна ймовірність мережі Байєса обчислюється за виразом:

$$P_B(X^1, X^2, \dots, X^n) = \prod_{i=1}^n P_B(X^i | \text{Par}(X^{(i)})). \quad (9)$$

Серед переваг байєсівських мереж слід зазначити: чітке розуміння суті взаємодії факторів процесу між собою, завдяки високому рівню візуалізації, який досягається представленням взаємодії між факторами процесу у вигляді причинно-наслідкових зв'язків; можливості врахування невизначеностей статистичного, структурного і параметричного характеру; наявність досить гнучких процедур оцінювання параметрів і станів досліджуваних процесів; поєднання в одній моделі великої кількості різномірних змінних; побудова моделей за наявності прихованих вершин і при неповних спостереженнях; наявність широкого спектра методів формування точних і наближених висновків.

Серед недоліків слід зазначити труднощі з отриманням апіорної інформації та відносно складність деяких обчислювальних процедур, пов'язаних з

числовим інтегруванням, оцінюванням параметрів і формуванням імовірнісних висновків. Мережі Байеса – це високоресурсний метод ймовірнісного моделювання процесів довільної природи з невизначеностями різних типів, який забезпечує можливість достатньо точного опису їх функціонування, оцінювання прогнозів та побудову системи управління. Методологія байєсівського аналізу даних та експертних оцінок цілком узгоджується з логікою дій особи, що приймає рішення при аналізі процесів довільної природи, формуванні альтернатив і прийнятті рішень [2].

### Висновки і напрямки подальших досліджень

В роботі проведено аналіз ряду відомих методів інтелектуального аналізу даних з точки зору доцільності їх застосування для побудови моделі системи підтримки прийняття рішень авіадиспетчера при виникненні особливих випадків в польоті.

Були проаналізовані: еволюційні методи, штучні нейронні мережі, нечітка логіка та байєсівські мережі. В результаті проведеного аналізу було встановлено, для побудови моделі СППР авіадиспетчера найбільш ефективним є використання апарату байєсівських мереж, який представляє собою перспективний ймовірнісний інструментарій, що дозволяє моделювати складні ієрархічні статичні та динамічні системи. На відміну від популярних на даний час моделей "чорних скриньок" байєсівська мережа дозволяє отримати зрозуміле пояснення одержаних висновків, має їх логічну інтерпретацію. Крім того перевагою таких мереж також є можливість врахування невизначеностей параметричного, статичного і структурного характеру і, що є особливо важливим, вони ґрунтуються на фундаментальних положеннях теорії ймовірностей, яка розроблялась не одне сторіччя.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Харченко В.П. Прийняття рішення оператором аеронавігаційної системи: монографія / В.П. Харченко, Т.Ф. Шмельова, Ю.В. Сікірда. – Кіровоград: КІА НАУ, 2012. – 292с.
2. Згуровський М.З. Байєсівські мережі в системах підтримки прийняття рішень / М.З. Згуровський, П.І. Бідюк, О.М. Терентьєв, Т.І. Просянкіна-Жарова. – Київ: ТОВ "Видавниче підприємство "Едельвейс", 2015. – 300 с.
3. Тереник Д., Кучук Г.А. Порівняння SQL і NOSQL баз даних на прикладі проектування аффілейт репорт систем. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 1(93). С. 83–89.
4. Kuchuk N. Method for calculating of R-learning traffic peakedness / N. Kuchuk; O. Mozhaiev, M. Mozhaiev; N. Kuchuk // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017. – 2017. – P. 359 – 362. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>
5. Неделько С.Н. Оценка эффективности информационной поддержки операторов автоматизированных систем обслуживания воздушного движения / С.Н. Неделько, В.Н. Неделько // Вісник КМУЦА. – К.: КМУЦА, 1999. – № 2. – С. 184-186.
6. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом: монографія / С.М.Неділько. – Кіровоград: ДІАУ, 2011. – 218с.
7. Сікірда Ю.В. Моделювання систем підтримки прийняття рішень авіадиспетчера в позаштатних льотних ситуаціях Автореф. дис. канд. техн. наук : 05.13.06 / Ю.В.Сікірда. — К., 2004. — 19 с.
8. Гожий О.П. Алгоритми інтелектуальних систем: Навчально-методичний посібник. – Миколаїв: Вид-во НАУКМА, 2001. – 28 с.
9. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М.: Горячая линия – Телеком, 2007. — 288 с.
10. Кучук Г.А., Саатсазов Б.Г. Распознавание человеческих эмоций с использованием нейросетевых технологий. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : ПНТУ, 2017. Вип. 4(44). С. 64-69.
11. Бондарев В. Н. Искусственный интеллект: учебное пособие для вузов / В. Н. Бондарев, Ф. Г. Аде. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. — 615с.

Received (Надійшла) 28.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.04.2020

### Development of a knowledge model for an information decision support system an aviation operator in case of special cases in flight

A. Kolesnyk, A. Boyko, T. Mishchenko, V. Rudenko

**Abstract.** The subject matter of the article is methods that allow solving the problem of uncertainty in the process of constructing decision support systems for air traffic controllers for special cases in flight. The goal is the analysis and justification of the choice of mathematical tool for constructing a DSS model of an air traffic controller. The tasks are: analysis of a number of well-known methods of data mining, namely: evolutionary algorithms, neural networks, fuzzy logic and Bayesian networks from the point of view of the appropriateness of their use in constructing mathematical models of decision support systems for air traffic controllers in case of special cases in flight. The methods used are: methods of analysis and synthesis of complex information systems, methods of simulation and statistical modeling. The following results were obtained. It has been established that the most effective way to build a DSS model of an air traffic controller is to use a Bayesian network tool. It is a promising probabilistic tool, that allows you to simulate complex hierarchical static and dynamic systems. This is due to the fact that, in contrast to the currently popular "black box" models, the Bayesian network provides an understandable explanation of the findings, has a logical interpretation, makes it possible to take into account the uncertainties of a parametric, static and structural nature and, which is especially important, is based on fundamental provisions of the theory of probability, which has been developed for more than one century. **Conclusions.** The direction of further research is the construction of a DSS model of an air traffic controller using Bayesian networks and probabilistic programming technology.

**Keywords:** DSS, air traffic controller, evolutionary algorithms, neural networks, fuzzy logic, Bayesian networks

М. Ю. Сорока

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

## МЕТОД АДАПТАЦІЇ ПОВЕДІНКИ АГЕНТІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ НАВЧАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ДИСПЕТЧЕРІВ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

**Анотація.** В рамках агентно-орієнтованого підходу з метою підвищення варіативності середовища підготовки диспетчерів управління повітряним рухом у статті удосконалено метод адаптації поведінки агентів навчального середовища інтелектуальної навчальної системи, що ґрунтується на знаннях про результати взаємодії агентів. На етапі внесення змін до параметрів підсистеми планування при настоюванні систем моделювання поведінки агентів запропоновано використовувати механізм самонастроювання. Для управління процесом самонастроювання поведінки інтелектуальних агентів в статті розроблено інструментарій адаптації системи планування поведінки агента. Застосування моделей поведінки агентів із методами планування дозволить збільшити показник успішності реалізації очікуваної поведінки агентів при побудові інтелектуальних навчальних систем. Запропонований у статті підхід адаптації поведінки агентів навчального середовища інтелектуальної навчальної системи дозволить підвищити його варіативність. Як наслідок, така інтелектуальна навчальна система дозволить вивести на якісно новий рівень підготовку диспетчерів управління повітряним.

**Ключові слова:** агент, адаптація, диспетчер управління повітряним рухом, середовище інтелектуальної навчальної системи, мультиагентні системи, планування, самонастроювання, теорія нечітких множин, ефективність навчання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розвиток методів штучного інтелекту та апаратних засобів дозволяє зроби́ти висновок про перспективу використання інтелектуальних навчальних систем (ІНС) у підготовці диспетчерів управління повітряним рухом (УПР) для підвищення ефективності їх навчання та вдосконалення навчального процесу. Підготовка диспетчерів УПР потребує особливої уваги через високу "ціну помилки". Відомо ряд прикладних досліджень реалізації моделей та методів адаптивного навчання авіаційних фахівців. Проте однією з головних проблем досліджень в сфері побудови інтелектуальних навчальних систем залишається створення навчального середовища, що відповідає реальному світу. Усунення даної проблеми можливо шляхом застосування агентно-орієнтованого підходу та удосконалення моделей і методів планування поведінки агентів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження, що розглядається у статті ґрунтується на відомих методах теорії нечітких множин та нечіткої логіки [1, 2].

Серед відомих робіт у галузі побудови мультиагентних систем та адаптації планів слід відзначити дослідження К.С. Амеліна [3], А.П. Карпенка [4], М.Г. Коляди [5]. Теорія адаптації розкрита в роботі [6], а її прикладне використання в навчальних системах в [7-12]. Дослідження методів побудови мультиагентних систем користуються увагою і закордонних авторів [13-16].

**Метою статті** є удосконалення методу адаптації поведінки агентів навчального середовища інтелектуальної навчальної системи підготовки диспетчерів управління повітряним рухом, який ґрунтується на знаннях про результати взаємодії агентів, що дозволило підвищити варіативність середовища та правильність прийняття рішення диспетчерами управління повітряним рухом.

### Виклад основного матеріалу

Однією з найважливіших особливостей інтелектуальної поведінки є здатність об'єкта пристосовуватися до зміни стану навколишнього середовища (середовища його функціонування) і параметрів, що характеризують його власний стан. Одним зі способів забезпечення такої поведінки є наділення об'єкта властивостями адаптації. У рамках методу синтезу інтелектуальних агентів навчального середовища диспетчерів УПР за властивості адаптації пропонується реалізувати в моделі планування їх поведінки. Таким чином, адаптивне планування - це метод планування поведінки, що дозволяє пристосовуватися до зміни параметрів системи шляхом модифікації алгоритму планування за рахунок корегування структури підсистеми планування.

Корегування структури підсистеми планування пропонується забезпечити за допомогою механізму синтезу нових нечітких правил на основі існуючих, використовуючи поточні значення параметрів середовища функціонування і самого агента. Операцію синтезу вирішено виконувати за рахунок зміни таких параметрів як функції приналежності нечітких правил планування. Для реалізації даного підходу, нечіткому правилу ставляться у відповідність дві різні функції приналежності для різних станів моделі, тобто для деякого параметра  $x$ , що представляє собою характеристику агента, задається два граничних стани  $(x_1)$ ,  $(x_2)$ . Для даних станів у нечіткому правилі визначаються функції приналежності, відповідно  $(\mu_1)$ ,  $(\mu_2)$ . З метою оцінки поточного стану агента  $x^*$  використовується підхід, що розроблений в [1], який полягає у визначенні ступеня близькості  $\omega$  стану  $x^*$  до станів  $(x_1)$ ,  $(x_2)$ . Якщо  $\omega = 0$  у випадку стану  $(x_1)$  та  $\omega = 1$  у випадку стану  $(x_2)$ , то функцію приналежності для стану  $x^*$  у загальному випадку можна визначити як:

$$\mu^* = \mu_1(1-\omega) + \mu_2\omega, \quad (1)$$

або в графічному вигляді, як це представлено на рис. 1.

На рис. 1 функція приналежності  $\mu^*$  правила планування змінюється безперервно від  $\mu_1$  до  $\mu_2$  та

пропорційно зміні параметру стану агента  $x^*$  від  $x_1$  до  $x_2$ . Таким чином, нечітке адаптивне планування можна представити як метод планування, в якому здійснюється адаптація параметрів правил планування на основі формули (1) у відповідності зі станом агента та зовнішнім середовищем.

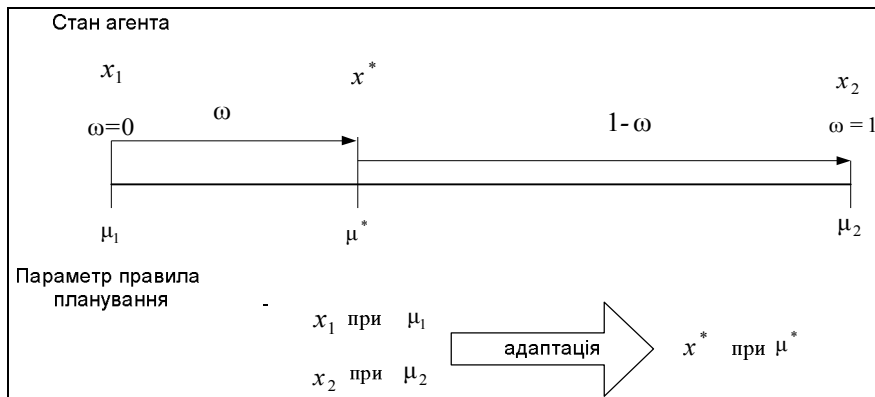


Рис. 1. Механізм адаптації нечіткого правила

Наведемо приклад нечіткої адаптації плану. Нехай деякому нечіткому правилу для граничних станів агента задані функції приналежності  $\mu_1$  до  $\mu_2$ , які базуються на функціях  $s$  та  $\pi$  класу, відповідно до [1, 2]. Для визначення  $\mu_1$  запишемо вираз:

$$\mu_1(x) = \mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad (2)$$

де  $\mu_A(x)$  – функція приналежності до нечіткої множини  $A \subseteq X$ ;  $\mu_B(x)$  – функція приналежності до нечіткої множини  $B \subseteq X$ .

Перепишемо формулу (2) у виді:

$$\mu(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad (3)$$

де  $\mu_A(x) = s(x; a, b, c), \quad (4)$

Функцію  $S$  запишемо як у [1, 2]:

$$s(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ 2 \cdot \left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2, & a \leq x \leq b; \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2, & b \leq x \leq c; \\ 1, & x \geq c; \end{cases} \quad (5)$$

де  $a, b, c$  – параметри функції приналежності.

Для визначення  $\mu_B(x)$  використаємо формулу:

$$\mu_B(x) = \mu_A(x) \times (1-\omega), \quad (6)$$

Тоді, для значення  $\omega = 0,8$ , нечітку множину з функцією приналежності  $\mu_1(x, \omega)$  можна представити, як це показано на рис. 2.

Аналогічно, отримаємо для  $\mu_2$ :

$$\mu_2(x) = \min\{\mu_C(x), \mu_D(x)\}, \quad (7)$$

де  $\mu_C(x) = \pi(x, b, c)$ .

Для запису функції  $\pi$  використаємо, згідно [1, 2]:

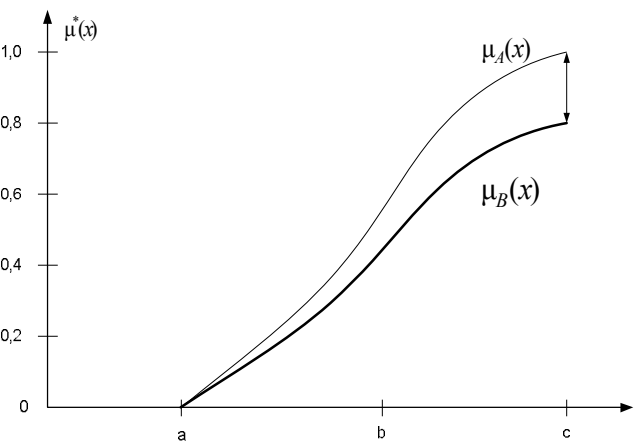


Рис. 2. Нечітка множина з функцією приналежності  $\mu_1(x, \omega)$

$$\pi(x; b, c) = \begin{cases} s(x; c-b, c-b/2, c); & x \leq c; \\ 1 - s(x; c, c+b/2, c+b); & x \geq c, \end{cases} \quad (8)$$

де  $b, c$  – параметри функції приналежності:

$$\mu_D(x) = \mu_C(x) \times \omega, \quad (9)$$

Тоді, наприклад, для значення  $\omega = 0,8$  нечітку множину з функцією приналежності  $\mu_2(x, \omega)$  має вигляд, наведений на рис. 3. Отже, адаптовану функцію приналежності можна представити як:

$$\mu^*(x, \omega) = \mu_1(x, \omega) \cup \mu_2(x, \omega) = \max\{\mu_1(x, \omega), \mu_2(x, \omega)\}, \quad (10)$$

Формулу (10) перепишемо у вигляді

$$\mu^*(x, \omega) = \max\{\mu_A(x) \times (1-\omega), \mu_C(x) \times \omega\}, \quad (11)$$

Тоді графічно нечітку множину з функцією приналежності  $\mu^*(x, \omega)$  для прикладу, що наведено на рис. 2, 3, можна представити формою (рис. 4).

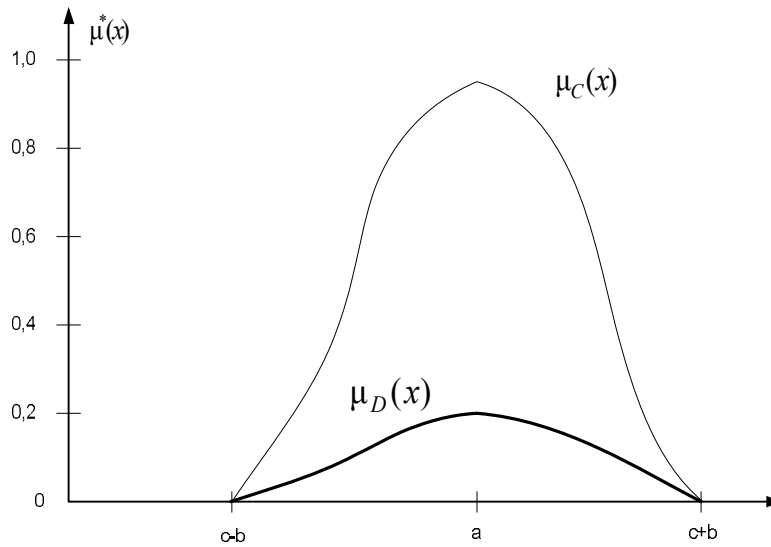


Рис. 3. Нечітка множина з функцією приналежності  $\mu_2(x, \omega)$

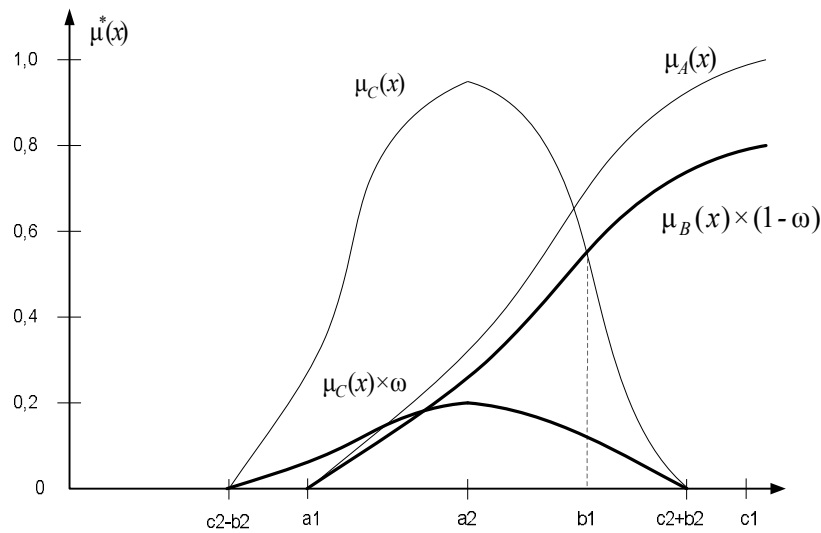


Рис. 4. Отримана в результаті адаптації нечітка множина з функцією приналежності  $\mu^*(x, \omega)$

В умовах значних змін у середовищі інтелектуальної навчальної системи підготовки диспетчерів УПР можливо отримати небажану поведінку агентів, що входять до її складу. У даних випадках зміну поведінки агентів пропонується здійснювати шляхом перенастроювання їх параметрів. У рамках розробленого підходу операцію настроювання системи моделювання поведінки інтелектуальних агентів пропонується виконувати автоматично за рахунок внесення змін до параметрів підсистеми планування, які налаштовуються, за допомогою механізму самонастроювання. З цією метою до множини параметрів системи планування необхідно включити підмножину параметрів  $V_T \subset V$ , які настроюються та підмножину поправок до цих параметрів  $V_{cor} \subset V$ .

Дані підмножини представимо так:  $V_T = \{v_i\}_{i \in I}$ ,  $V_{cor} = \{\Delta v_i\}_{i \in I}$ , де  $v_i$  – параметр, який настроюється;  $\Delta v_i$  – поправка до параметру  $v_i$ ;  $I = \{1, \dots, N\}$  – множина індексів;  $N$  – кількість таких параметрів.

Як інструментарій управління процесом самонастроювання в роботі використовується підмножина правил, яка представляється як  $R_{ST}^f \subset R$ , де  $R$  – множина правил системи планування поведінки інтелектуального агента.

Відповідно до розробленого інструментарію, адаптація системи планування поведінки агента починається, коли виконується правило  $st < 0$ :

$$st = \min \{ \mu_{P_1}(P_1), \mu_2(P_2), \dots, \mu_{P_L}(P_L) \}, \quad (12)$$

де  $st$  – параметр, який відхилення стану системи від еталонного значення;  $\mu_{P_i}(P_i)$  – значення функції приналежності, яка характеризує міру відхилення  $i$ -го контролюємого параметру агента  $P_i$ ,  $i = \{1, \dots, L\}$  від еталонного  $P_i^*$ ;  $L$  – кількість контролюємих параметрів;  $\Theta \in V_S$  – множина службових параметрів.

Відповідно, припинення самонастроювання відбувається у випадку, коли виконується така умо-

ва:  $st \geq 0$ . Настроювання параметрів моделі здійснюється чергово, щоб уникнути їх взаємного впливу на контрольовані характеристики агента. Вибір першого параметру (при початку роботи системи) або наступного параметра виконується на основі випадкового значення, отриманого з заданого інтервалу, розподіленого по нормальному закону. Кількість настроювань, зроблених підряд, одного параметра системи фіксується, і у випадку його перевищення константи  $k \in V_S$  виконується вибір наступного параметру налаштування.

### Висновки

В статті отримав подальший розвиток метод адаптації поведінки агентів навчального середовища

інтелектуальної навчальної системи підготовки диспетчерів управління повітряним рухом, який ґрунтується на знаннях про результати взаємодії агентів, що дозволило підвищити варіативність середовища.

На основі отриманих значень була проведена рекомбінація розробленого середовища інтелектуальної навчальної системи підготовки диспетчерів управління повітряним рухом.

Отримані експериментальні дані дослідження інтелектуальних навчальних систем.

Застосування моделей поведінки з використанням методів планування дозволило збільшити показник успішності реалізації очікуваної поведінки агентів щодо існуючої системи підготовки диспетчерів управління повітряним рухом.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. James V. Buckley, Esfandiar Eslami, Thomas Feuring. Fuzzy Mathematics in Economics and Engineering. – М.: Physica-Verlag, 2002. – 296 с.
2. Freerk A. Lootsma Fuzzy Logic for Planning and Decision Making (Applied Optimization, Vol. 8). – 2017.
3. Амелин К.С., Баклановский М.В., Граничин О.Н. и др. Адаптивная мультиагентная операционная система реального времени // Стохастическая оптимизация в информатике, 2013. - Т. 9. Вып. 1. - С. 3-16.
4. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем. Методы и приложения / Л.А. Растринин.- Рига: Зинатне, 1981. - 375 с.
5. Карпенко А.П. Модельное обеспечение автоматизированных обучающих систем. Обзор. [Текст] / А.П.Карпенко // Наука и образование – 2011. - №7. – С.2-64.
6. Шабалина О.А. Модели и методы для управления процессом обучения с помощью адаптивных обучающих систем: Дис...канд. техн. наук: 05.13.10 / О.А. Шабалина.- Астрахань, 2005.- 158 с.
7. Коляда М.Г. Виды моделей, обучаемых в автоматизированных обучающих системах / М.Г. Коляда // Искусственный интеллект, 2008, №2, С. 28-33.
8. Городецкий В.И. Многоагентные технологии для промышленных приложений: реальность и перспектива / В.И. Городецкий, П.О. Скобелев, А.В. Хабалов // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 6(55). С. 2-41.
9. Kuchuk N. Method for calculating of R-learning traffic peakedness / N. Kuchuk; O. Mozhaiev, M. Mozhaiev; H. Kuchuk // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017. – 2017. – P. 359 – 362. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>
10. Mukhin, V., Kuchuk, N., Kosenko, N., Kuchuk, H. and Kosenko, V. (2020), "Decomposition Method for Synthesizing the Computer System Architecture, Advances in Intelligent Systems and Computing", AISC, vol. 938, pp 289-300, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2_27)
11. 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>
12. Кучук Г.А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка / ГА Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ІС, 2005. – Вип. 5 (45). – С. 74-84.
13. Leitao P., Vrba P. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. 2011. LNCS 6867. pp. 15–28.
14. DeLoach S.A. Moving multi-agent systems from research to practice // International Journal Agent-Oriented Software Engineering. 2009. vol. 3. no. 4. pp. 378–382.
15. Müller J., Fisher K. Application Impact of Multi-agent Systems and Technologies: A Survey // Agent-oriented software engineering. 2014. pp. 27–53.
16. Bugaychenko, D. Y. MASL: A logic for the specification of multiagent real-time systems. // Proc. 5th International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems.- Leipzig (Germany): Springer-Verlag, 2017.- Pp. 183–192.

Received (Надійшла) 11.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Agent behavior adaptation method in intelligent training manager preparation system air traffic control

M. Soroka

**Abstract.** In the framework of the agent-based approach, in order to increase the variability of the training environment for air traffic control dispatchers, the article improves the method for adapting the behavior of the agents of the learning environment of an intelligent learning system based on knowledge of the results of agent interactions. At the stage of making changes to the parameters of the planning subsystem, when insisting on agent behavior modeling systems, it is proposed to use the self-tuning mechanism. To manage the process of self-tuning the behavior of intelligent agents, the article developed a toolkit for adapting the agent behavior planning system. The use of agent behavior models with planning methods will increase the success rate for the implementation of the expected agent behavior in the construction of intelligent learning systems. The approach proposed in the article for adapting the behavior of the agents of the learning environment of the intellectual learning system will increase its variability. As a result, such an intelligent training system will bring to a new level the training of air traffic controllers.

**Keywords:** agent, adaptation, air traffic control manager, intelligent learning system environment, multiagent systems, planning, self-tuning, fuzzy set theory, learning efficiency.



В. Б. Кононов, О. А. Кононова, Ю. Д. Мусаїрова

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

## ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО СУЧАСНИХ СПОСОБІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БЕНЗИНОВИХ ТА ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ВІЙСЬКОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА СИЛОВИХ УСТАНОВОК ЗРАЗКІВ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

**Анотація.** Розглядаються вимоги до систем та пристроїв діагностування привідних двигунів військових електростанцій і силових установок бронетанкової і автотракторної техніки, обґрунтовується необхідність врахування додаткових показників, які забезпечують необхідну глибину та повноту контролю. На прикладі розроблених оригінальних технічних рішень обґрунтовуються способи та пристрої оцінювання технічного стану двигунів внутрішнього згоряння шляхом визначення ступеня нерівномірності кутової частоти обертання, розглядаються шляхи підвищення точності процесу вимірювань миттєвої кутової частоти обертання, засновані на відмові від виконання операції диференціювання та на впровадженні систем автоматичного фазового підстроювання, при визначенні швидкості й прискорення, організації безперервних вимірювань, використання при проведенні вимірювань виключення одного з працюючих циліндрів для оцінки його внеску в результуючу виробляему потужність, врахуванні в процесі випробувань крутильних коливань, що виникають в пружній системі валопроводу і можуть вплинути на точність визначення кутових відрізків.

**Ключові слова:** привідний двигун об'єктів військової техніки, діагностування, ступінь нерівномірності кутової частоти обертання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При визначенні технічного стану привідних двигунів військових електростанцій і силових установок зразків озброєння і військової техніки можливо використовувати безліч параметрів [1-4], серед яких частіше за все використовують такі як питомі витрати палива, тиск та температура газів в циліндрах двигунів, температура вихлопних газів, миттєве значення частоти обертання вала двигуна тощо, причому з метою уточнення пошуку місця несправності крім загальної оцінки стану об'єкта діагностування проводять оцінювання стану окремих систем та агрегатів двигуна. Для порівняння різних варіантів систем діагностування прийнято [5-7] використовувати такі показники:

- імовірність помилки результатів діагностування  $P_{ij}$ , тобто імовірність того, що об'єкт знаходиться в технічному стані  $i$ , а по результатам діагностування вважається таким, що знаходиться в технічному стані  $j$ ;
- імовірність правильного визначення дійсного технічного стану об'єкта;
- середню оперативну тривалість діагностування  $\tau_{\partial}$ , яка дорівнює математичному очікуванню тривалості однократного діагностування;
- середні витрати на діагностування  $C_{\partial}$ , які дорівнюють математичному очікуванню витрат на однократне діагностування;
- середні працевитрати на виконання діагностування  $S_{\partial}$ , які дорівнюють математичному очікуванню працевитрат при проведенні однократного діагностування.

Зазначених показників в ряді випадків недостатньо при проведенні діагностування привідних дви-

гунів військових електростанцій і особливо силових установок зразків озброєння і військової техніки, а саме бронетанкової і автотракторної техніки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1, 2, 5-7, 16 -20] наводяться відомі теоретичні і практичні результати, які отримані іншими авторами за даним напрямом. Разом з тим, в відомих працях недостатньо уваги приділено вибору та обґрунтуванню додаткових показників, які слід враховувати при розробці систем діагностування зразків озброєння та військової техніки.

**Мета статті** – обґрунтування додаткових показників, які слід враховувати при виборі систем діагностування військових привідних двигунів, і обґрунтування технічних рішень, які дозволяють при їх реалізації досягнути бажаного результату і забезпечити отримання під час проведення діагностування необхідних параметрів, які дозволять отримати вимагаєму глибину, повноту та оперативність контролю.

### Виклад основного матеріалу

При проведенні діагностування привідних двигунів об'єктів військової техніки, крім вже зазначених показників, треба отримати показники, які дозволять забезпечити необхідну глибину та повноту контролю. Глибина контролю  $\lambda$  (глибина пошуку несправності) характеризує ту складову частину об'єкта діагностування, з точністю до якої визначається місце дефекту. Повнота контролю  $P_k$  оцінюється як відношення кількості інформації, яка отримується при кількості параметрів  $N_k$  до кількості інформації, яку можливо отримати по результатам діагностування по всім діагностичним параметрам  $N$ . При оцінюванні глибини контролю в якості показника пропонується імовірність правильного діагностування

$$D = 1 - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 P_{ij}; \quad j \neq i, \quad (1)$$

де  $i \in \{1, 2\}$  - кількість технічних станів об'єкта діагностування, що розглядаються;  $j \in \{1, 2\}$  - кількість результатів оцінки технічного стану об'єкта, що розглядаються.  $P_{12}$  - імовірність помилки діагностування першого роду, тобто імовірність одночасної появи двох подій: об'єкт працездатний, а в результаті діагностування вважається непрацездатним,

$$P_{12} = \sum_{e=1}^k P_e^c P_{2e}^a P_{12e}^b, \quad (2)$$

де  $P_e^c$  - апіорна імовірність знаходження засобу діагностування в технічному стані  $e \in \{1, k\}$ ;  $P_{2e}^a$  - умовна імовірність отримання результату про те, що об'єкт знаходиться в непрацездатному стані при умові того, що засіб діагностування знаходиться в технічному стані  $e$ ;  $P_{12e}^b$  - умовна імовірність знаходження об'єкта в працездатному стані при умові, що отриманий результат про те, що об'єкт непрацездатний і засіб діагностування знаходиться в технічному стані  $e$ ;  $P_{21}$  - імовірність помилки другого роду, тобто імовірність одночасної появи двох подій, а саме об'єкт непрацездатний, а по результатах діагностування вважається працездатним,

$$P_{21} = \sum_{e=1}^k P_e^c P_{1e}^a P_{21e}^b, \quad (3)$$

де  $P_{1e}^a$  - умовна імовірність отримання результату про те, що об'єкт знаходиться в працездатному стані при умові, що засіб діагностування знаходиться в стані  $e$ ;  $P_{21e}^b$  - умовна імовірність знаходження об'єкта в непрацездатному стані при умові, що отриманий результат про те, що об'єкт працездатний, а засіб діагностування знаходиться в стані  $e$ .

Повнота контролю  $\Pi_k$  є такою

$$\Pi_k = \sum_{n=1}^{N_k} I_n / \sum_{n=1}^N I_n, \quad (4)$$

де  $n \in (1, N)$  - загальна кількість діагностичних параметрів;  $N_k$  - кількість параметрів, які контролюються;  $I_n$  - кількість інформації, яка отримується при діагностуванні об'єкта по параметру  $n$ .

В якості загального показника при виборі системи діагностування слід вибрати імовірність отримання правильного діагнозу  $V$ , яка пропорційна імовірності функціонування технічних засобів діагностування  $P_{зас}$ , повноті контролю  $\Pi_k$  й імовірності правильного діагностування  $D$ , тобто

$$V = P_{зас} \cdot \Pi_k \cdot D. \quad (5)$$

Виходячи з викладеного, обґрунтуємо запропоновані технічні рішення засобів технічного діагностування привідних двигунів об'єктів військової техніки. При визначенні як загального технічного стану привідних

двигунів об'єктів військової техніки, так і стану його окремих циліндрів, виходячи з необхідності правильного діагнозу і маючи на меті забезпечити необхідну повноту контролю в якості діагностичного параметра доцільно вибрати величину нерівномірності обертального моменту двигуна, яка проявляється в нерівномірності частоти обертання вала двигуна. Цей діагностичний параметр характеризує удосконаленість процесів перетворення хімічної енергії палива в тепло і далі перетворення тепла в механічну роботу в кожному з циліндрів двигуна, характеризує максимальні газові і інерційні зусилля, на цей показник впливають безліч чинників, які визначають роботу двигуна. В якості міри для оцінювання нерівномірності обертального моменту пропонується обирати ступінь нерівномірності частоти обертання вала  $\delta$ , для визначення цієї величини в [8] пропонується вимірювати приращення кутової частоти обертання від мінімального її значення до максимального в такті розширення для кожного  $i$ -го циліндра двигуна  $\Delta\omega_i'$ , вимірювати зменшення кутової частоти обертання вала від максимального її значення до мінімального в такті стискування для кожного з  $i$ -го циліндра двигуна  $\Delta\omega_i''$  й знаходити ступінь нерівномірності шляхом визначення відношень сум величин  $\Delta\omega_i'$  та  $\Delta\omega_i''$  до кількості циліндрів  $n$ , а значення  $\delta$  знаходити як відношення максимальної різниці з  $\Delta\omega_i'$  або  $\Delta\omega_i''$  до середнього значення цієї різниці, тобто визначити  $\delta$  з таких відношень:

$$\delta = \Delta\omega_i' \cdot n / \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i'; \quad \delta = \Delta\omega_i'' \cdot n / \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i''. \quad (6)$$

При отриманні таким чином оцінки стану окремих циліндрів обов'язково слід враховувати величину прискорення кутової частоти обертання вала  $\varepsilon$ , шляхом визначення похідної

$$\varepsilon' = \frac{d\Delta\omega_i'}{dt}; \quad \varepsilon'' = \frac{d\Delta\omega_i''}{dt}. \quad (7)$$

Отримані в такий спосіб результати мають низьку точність, пов'язану з недостатньою точністю визначення значень  $\Delta\omega_i'$ ,  $\Delta\omega_i''$ ,  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$ , обумовленою виконанням операції дискретного диференціювання. На наш погляд, при визначенні ступеня нерівномірності роботи циліндрів двигуна слід вимірювати інтервали часу на протязі яких відбувається поворот вала на заданий кут, який дорівнює куту повороту вала між моментами вприскування палива в сусідніх за порядком роботи циліндрів

$$t_i = \phi_{en} / \omega_i, \quad (8)$$

якщо вимірювати величину  $t_i$  шляхом підрахунку кількості імпульсів  $N_i$ , які поступають за час  $t_i$  з виходу генератора імпульсів, частота  $f_2$  якого стабільна, та величина  $N_i$  буде дорівнювати

$$N_i = \frac{t_i}{T_2} = \frac{\phi_{en}}{\omega_i} f_2, \quad (9)$$

де  $T_2$  - період слідування імпульсів з виходу генератора імпульсів. Оскільки значення миттєвої частоти

обертання вала, які відповідають робочому ходу поршня в тому чи іншому циліндрі двигуна неоднакові, оскільки потужність, яка розвивається циліндрами неоднакова, то час повороту вала  $t_i$  неоднаковий. Таким чином, при порівнянні величин  $N_i$  та  $N_{i+1}$  у відповідності до порядку роботи циліндрів визначається величина відносної ступені нерівномірності частоти обертання  $\bar{\delta}$

$$\bar{\delta} = N_i - N_{i+1} = \phi_{en} f_z (\omega_{i+1} - \omega_i) / (\omega_i \cdot \omega_{i+1}), \quad (10)$$

оскільки  $\delta = (\omega_{i+1} - \omega_i) / \omega_i$ , а  $\bar{\delta} = \delta \cdot f_z / \omega_{i+1}$ .

Значення  $\bar{\delta}$  зазвичай повинні знаходитися в діапазоні від 1/150 до 1/300 [2], що вимагає забезпечувати високу інструментальну точність при реалізації власне процесу вимірювань. Крім того, це вимагає враховувати інші чинники, які можуть впливати на результати вимірювань, а саме помилку, пов'язану з можливим закручуванням валопроводу під дією виникаючих крутильних коливань.

Розглянемо основні принципи електричної схеми вимірювачів ступеня нерівномірності частоти обертання, які дозволяють отримати вимагаєму точність результатів вимірювання [9-14]. При цьому основну увагу приділимо обґрунтуванню оригінальних технічних рішень, прийнятих при розробці вимірювачів миттєвої кутової частоти обертання вала.

На рис. 1 приведена принципова електрична схема пристрою для діагностики дизеля. Пристрій містить у своєму складі датчик положення верхньої мертвої точки поршня двигуна 1, формувач імпульсів 2, Т-тригер 3, диференціюючий блок 4 з'єднаний послідовно. При цьому диференціюючий блок 4 приєднаний до установочного входу розподільника імпульсів 8 першим нерухомим контактом перемикача 26. В пристрої використовується датчик кутового положення колінчатого вала 6, який через формувач імпульсів 7 з'єднаний зі входом множника частоти 8 та з сигнальним входом розподільного блока 5. Вихід множника частоти 8 з'єднаний з S-входом RS-тригера 9 та першим входом логічних елементів АБО 10 R-вхід RS-тригера 9 з'єднаний з виходом генератора імпульсів 12, а вихід RS-тригера 9 з'єднаний з входом активного фільтру 13 у складі трьох послідовно з'єднаних інтегруючих операційних підсилювачів 14, 15 та 16, охоплених зворотними зв'язками. Виходи розподільного блока 5 з'єднані з трьома іншими контактами перемикача 26 та чотирма нерухомими контактами перемикача 27. Рухомі контакти перемикача 26 з'єднані з R-входом RS-тригера 25 та з установочними входами лічильників 28 та 29. На форсунках двигуна установлені датчики 17-20, які з'єднані з нерухомими контактами перемикача 21, рухомий контакт якого з'єднаний зі входом підсилювача 22, вихід якого з'єднаний з сигнальним входом порогового елемента 23 і через дільник напруги 24 з'єднаний з додатковим входом порогового елемента 23, вихід порогового елемента 23 з'єднаний до другого входу елемента АБО 10 та до S-входу RS-тригера 25. Вихід RS-тригера 25 з'єднаний з другим входом елемента АБО 11, вихід якого з'єднаний зі входом лічильника 29.

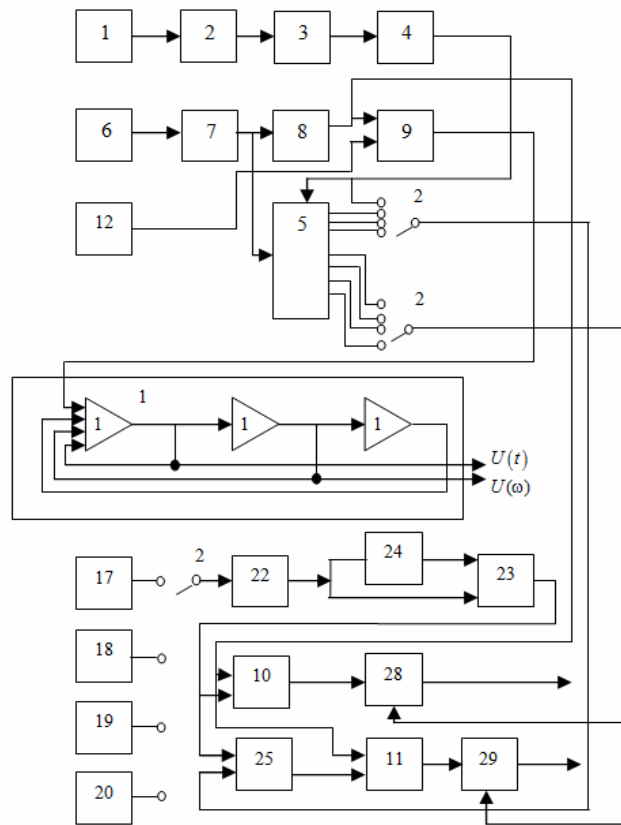


Рис. 1. Принципова електрична схема пристрою для діагностики дизеля

Пристрій працює таким чином. Перед початком вимірювань поршень першого циліндра встановлюється в положення, яке відповідає його стану в верхній мертвій точці. В цьому положенні здійснюється співпадіння положення датчика кутового положення колінчатого вала 6 з однією з кутових міток на колінчатому валі. Кількість кутових міток  $K$  за один оберт вала повинно бути вибрано таким, щоб вона була кратне кількості циліндрів двигуна  $n$ , тобто  $K = m \cdot n$ , де  $m$  - ціле число.

Датчик 1 на своєму виході формує імпульси при заході поршня в верхню мертву точку. Імпульси від датчика 1 через формувач імпульсів 2 поступають на вхід Т-тригера 3, при цьому кожний непарний імпульс встановлює на виході Т-тригера 3 сигнал високого рівня, а кожний парний імпульс встановлює на виході Т-тригера 3 сигнал низького рівня. В момент зміни сигналу на виході Т-тригера 3 з низького рівня на високий диференціюючий блок 4 формує імпульс, який поступає на установочний вхід блока 5. Таким чином на виході диференціюючого блока 4 формується один імпульс за два оберти вала, а саме формується імпульс в момент часу коли поршень першого циліндра заходить в положення верхньої мертвої точки в такті стискування.

Імпульси з виходу датчика 6 положення колінчатого вала через формувач імпульсів 7 подаються на вхід множника частоти 8. Частота слідування імпульсів з виходу датчика 8 визначається кутовою частотою обертання вала і зміна часових інтервалів між імпульсами з виходу формувача імпульсів 7 характеризує нерівномірність кутової частоти обертання вала. Імпу-

льсна послідовність з виходу множника частоти 8 подається на S-вхід першого RS-тригера 9, на R-вхід якого подаються імпульси з виходу генератора імпульсів 12, частота слідування яких обирається таким чином, щоб вона дорівнювала добутку номінальної частоти обертання на кількість міток  $K$  колінчатого валу і на коефіцієнт множення множника частоти 8. Тривалість імпульсів з виходу RS-тригера 9 пропорційна куту зсуву за фазою між дійсним і очікуваним положенням колінчатого валу двигуна.

Відмінною особливістю розглядаемого пристрою від відомих пристроїв такого типу є наявність в цьому пристрої активного фільтра 13, який містить три послідовно з'єднані інтегруючі операційні підсилювачі 14, 15 та 16, охоплені зворотними зв'язками таким чином, що їх результуюча передатна функція  $W(p)$  відповідає передатній функції ланки третього порядку

$$W(p) = K_1 / (ap^3 + bp^2 + cp + 1), \quad (11)$$

де  $K_1$  - коефіцієнт підсилення;  $a, b, c$  - коефіцієнти при змінних;  $p$  - оператор диференціювання.

Оскільки ланка, передатна функція якої описується виразом 11, має певну визначену смугу пропускання, її можна розглядати як фільтр. Напряга на виході операційного підсилювача 16 пропорційна поточному куту зсуву за фазою між дійсним й очікуваним положенням колінчатого валу. Це означає, що напряга на вході інтегруючого операційного підсилювача 16, тобто напряга на виході інтегруючого операційного підсилювача 15 пропорційна різниці між дійсною і розрахунковою кутовою частотою обертання валу. Оскільки це так, то напряга на вході інтегруючого операційного підсилювача 15, тобто напряга на виході першого операційного підсилювача 14 пропорційна прискоренню колінчатого валу, а активний фільтр є вимірювачем кута, кутової швидкості і кутового прискорення, в якому не використовуються блоки диференціювання, що підвищує точність вимірювань.

Вибір циліндра для проведення діагностування здійснюється установкою перемикачів 21, 26, 27 у відповідне положення. Для діагностування першого за порядком роботи циліндра перемикачі 21, 26 та 27, встановлюють в перше положення. Під час подачі палива в перший циліндр двигуна датчик вібрацій 17 встановлений на форсунці цього циліндра, формує сигнал який подається на вхід підсилювача 22. Підсилювач 22 підсилює сигнал, що надходить до його входу і здійснює його селекцію в смузі частот, яка відповідає максимальній інтенсивності коливань, що виникають при спрацюванні форсунок. Сигнал з виходу підсилювача 22 подається на сигнальний вхід порогового елемента 23 та на вхід дільника напруги 24, величина коефіцієнта передачі якого визначається максимальним значенням циклової нестабільності вібраційного сигналу і завжди менше одиниці. Пороговий елемент 23 спрацьовує і на його виході з'являється прямокутний імпульс, передній фронт якого відповідає моменту початку подачі палива, а задній фронт закінченню цього процесу. Сигнал з виходу порогового елемента 23 подається до другого входу першого елемента АБО 10 і до S-входу другого RS-тригера 25. На

перший вхід першого елемента АБО 10 поступає імпульсна послідовність з виходу множника частоти 8. На інтервалі часу, коли існує сигнал з виходу порогового елемента 23, кожен черговий імпульс з виходу множника частоти 8 подається на сигнальний вхід першого лічильника 25, в якому записується число, що пропорційне тривалості подачі палива в 1-й циліндр.

Сигнал з виходу порогового елемента 23 подається на S-вхід другого RS-тригера 25, переводить цей тригер в одиничний стан і через другу логічну схему АБО 11 кожний черговий імпульс з виходу множника частоти 8 подається на сигнальний вхід другого лічильника 29. Запис в лічильнику 29 припиняється в момент приходу імпульсу на R-вхід 2-го RS-тригера 25.

Перший 28 та другий 29 лічильник встановлюються в вихідний стан при появі сигналу на четвертому виході блока 5, до входу якого подається імпульсна послідовність з виходу другого формувача імпульсів 7.

Сигнали на першому, другому і третьому виході розподільного блоку 5 з'являються тоді, коли кількість імпульсів, що подається на його вхід дорівнює  $K/2$ ,  $K$  та  $3/2K$ . Сигнали на четвертому, п'ятому, шостому та сьомому виходах блока 5 з'являються тоді, коли кількість імпульсів, які поступають на його вхід відповідно дорівнює  $K/4$ ,  $3K/4$ ,  $5K/4$ ,  $7K/4$ . Сигнали на четвертому, п'ятому, шостому, сьомому виходах блока 5 забезпечують скидання першого 28 та другого 29 лічильників. Таким чином в запропонованому пристрої здійснюється діагностування паливної апаратури дизеля, а введення до складу пристрою активного фільтра дозволяє здійснювати оцінку ступеня нерівномірності частоти обертання, тобто дати оцінку стану окремих циліндрів двигуна.

Оригінальне технічне рішення побудови вимірювача частоти обертання прийнято при розробці пристрою для оцінювання нерівномірності роботи циліндрів двигуна внутрішнього згорання [10].

Принциповою особливістю цього пристрою, що дозволяє суттєво підвищити точність вимірювання кутової частоти обертання є використання в цьому пристрої системи автоматичного фазового підстроювання частоти при вимірюванні миттєвої кутової частоти обертання валу.

Ефект підвищення точності при використанні в пристроях діагностики систем автоматичного фазового підналаштування частоти досягається завдяки тому, що в цих системах кутову частоту керуемого генератора імпульсів при відсутності керуючої напруги на його вході  $\omega_0$  обирають свідомо меншою кутової частоти діагностуемого двигуна. Завдяки цьому кутовий відрізок пропорційний різниці частот  $\omega_{ном} - \omega_0$  зростає і підвищується точність визначення інтервалу часу, за який вал повернеться на кут між спалахами в сусідніх циліндрах. Це особливо важливо тому, що допускаємо значення ступеня нерівномірності  $\delta$  дуже мале і лежить в діапазоні  $1/300 \div 1/150$ .

Специфічною особливістю способу [11] визначення технічного стану двигуна внутрішнього згорання та пристрою, який реалізує цей спосіб, є його використання для двигунів, у яких є можливість виключа-

ти під час випробувань циліндри двигуна. За цим способом випробування виконуються при послідовному вимиканні одного із працюючих циліндрів. Під час випробувань вимірюють тривалість циклу для одного вимкненого і решти працюючих циліндрів. Вимірюється тривалість часу від моменту, що відповідає положенню вала в верхній мертвій точці в такті стискування на кутовому інтервалі, що відповідає куту між черговими спалахами в циліндрах. Далі знаходять зростання тривалості циклу при вимкненому циліндрі у порівнянні з середньою тривалістю робочого циклу при всіх працюючих циліндрах. По результатах порівняння роблять висновок щодо технічного стану двигуна та вважають циліндр несправним, якщо величина зростання тривалості циклу при вимкненому циліндрі менше величини середньої тривалості циклу  $t_{cp}$ , зменшеної в  $(n-1)(1+\overline{\delta_{don}})$  раз, де  $n$  - кількість циліндрів двигуна;  $\overline{\delta_{don}}$  - ступінь нерівномірності в відносних одиницях, яка допустима для даного типу двигуна. Вибір величини  $t_{cp}/((n-1)(1+\overline{\delta_{don}}))$  в якості показника для оцінювання технічного стану двигуна пояснюється наступним. Коли всі циліндри двигуна знаходяться в справному стані та їх внесок в роботу рівновеликий, тривалість циклу  $t_n$  в  $n$ -му відключеному циліндрі визначається як

$$t_n = (n/(n-1)) \cdot t_{cp}, \quad (12)$$

при цьому величина зростання тривалості циклу  $\Delta t$ :

$$\Delta t = t_{cp} - t_n = t_{cp}/(n-1). \quad (13)$$

Суттєвою особливістю пристрою для визначення нерівномірності роботи циліндрів двигуна внутрішнього згорання [12] є підвищення точності при визначенні технічного стану окремих циліндрів за рахунок врахування при проведенні випробувань впливу на результат вимірювання часу проходження кутових відрізків при повороті вала двигуна круглих коливань, які виникають в пружній системі валопроводу двигуна під час його роботи.

Оригінальне рішення корекції результатів вимірювання кутової частоти обертання запропоновано в пристрої для визначення нерівномірності роботи циліндрів двигуна внутрішнього згорання [13].

Особливістю роботи пристрою для оцінювання нерівномірності роботи циліндрів двигуна внутрішнього згорання [14] є дещо інший шлях врахування впливу круглих коливань на результати визначення миттєвих значень кутової частоти обертання.

До складу пристрою для оцінювання нерівномірності роботи циліндрів двигуна внутрішнього згорання входять датчик положення колінчатого вала, генератор імпульсів, селектори, вихідні індикатори та елемент затримки, введені датчик циклів, датчик верхньої мертвої точки, кількість яких дорівнює кількості циліндрів двигуна, перший з трьох виходами та другий з шістьма виходами розподільника імпульсів, перший з яких послідовно з'єднаний через перший та другий Т-тригери, які утворюють шифратор датчика циклів, власне з датчиком частот, а другий розподільник імпу-

льсьві з'єднаний через п'ять послідовно включених Т-тригерів, які утворюють шифратор датчика положення колінчатого вала, власне з цим датчиком.

Робота пристрою полягає в наступному. Виходячи з рівняння руху вала двигуна, яке в найпростішому випадку представлено рівнянням першого порядку

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_p - M_0, \quad (14)$$

де  $J$  - масовий момент інерції;  $M_p, M_0$  - моменти руху та опору, слідує, що у випадку незмінного моменту опору (незмінного навантаження) нерівномірність частоти обертання вала двигуна  $\omega$  обумовлена нерівномірністю моменту руху, тобто, якщо  $M_p < M_0$ , кутова частота  $\omega$  зростає і навпаки при  $M_0 > M_p$  кутова частота  $\omega$  падає.

Порівнюючі миттєві значення кутової частоти обертання на інтервалах часу, що дорівнюють часу повороту вала в такті робочого ходу на кут, який відповідає куту між спалахами в циліндрах за порядком їх роботи, робиться висновок про стан кожного з циліндрів. Випробування проводять при незмінному навантаженні. Колінчатий вал двигуна встановлюють в таке положення, коли зубець датчика положення колінчатого вала суміщений з однією із відміток, які закріплені на розподільчому валі двигуна. Такт роботи пристрою визначається датчиком циклів, який спрацьовує після фіксації моменту подачі палива в перший, за порядком роботи, циліндр двигуна.

## Висновки

1. При визначенні технічного стану привідних двигунів військових електростанцій та силових установок бронетанкової і автотракторної техніки в процесі вибору діагностичних параметрів, які дозволяють з'ясувати стан об'єкту, що діагностується, крім загальних вимог до способів і засобів діагностування слід враховувати такі вимоги як повнота, глибину та оперативність контролю.

2. Такий діагностичний параметр як нерівномірність кутової частоти обертання вала дозволяє оцінити досконалість процесів перетворення хімічної енергії палива в тепло і далі в механічну роботу, тобто дозволяє оцінити не тільки загальний стан двигуна, а також і стан його окремих циліндрів.

3. Для підвищення точності результатів вимірювання ступеня нерівномірності частоти обертання вала при розробці діагностичних пристроїв доцільно уникати операцій диференціювання при вимірюванні частоти і прискорення, використовуючи при цьому активні фільтри, побудовані на інтегруючих операційних підсилювачах, або для вимірювання кутів та кутових швидкостей обертання використовувати системи автоматичного фазового підстроювання частоти.

4. Для підвищення оперативності діагностування при розробці пристроїв діагностування слід запропонувати таку організацію проведення діагностування, яка дозволяє здійснювати вимірювання на працюючому двигуні і одночасно отримувати інформацію про стан кожного з циліндрів двигуна.

5. Дієвим способом оцінювання стану роботи окремих циліндрів є проведення вимірювань миттєвих значень кутової частоти обертання під час відключення одного з циліндрів двигуна.

6. Наведені технічні рішення пристроїв для оцінювання ступеня нерівномірності роботи двигуна дозволяють розробникам нових пристроїв діагностування спростити розробку пристроїв, що створюються.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобилей. Теоретические основы / В.Д. Мигаль. – Х.: Майдан, 2014. – 516 с.
2. Кононов Б.Т. Вибір показника для оцінювання технічного стану дизель-генератора / Б.Т. Кононов, О.І. Бондаренко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2017. – № 3(52). – С. 113-117.
3. Kuchuk N. Method for calculating of R-learning traffic peakedness / N. Kuchuk; O. Mozhaiev, M. Mozhaiev; H. Kuchuk // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017. – 2017. – P. 359 – 362. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>
4. Адамченко М.І., Березуцький В.В., Кучук Н.Г. Палант О.Ю. Загальносистемний ризик відмови системи після модернізації. *Системи обробки інформації*: збірник наукових праць. Х.: ХУПС, 2015. Вип.10 (135). С. 113-118.
5. Диагностика и техническое обслуживание машин / [Ананьин А.Д., Михлин В.М. и др.].— М.: Академия, 2008. – 432 с.
6. Кузнецов А.С. Техническое обслуживание и диагностика двигателя внутреннего сгорания. М.: Академия, 2011. – 80 с.
7. Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобилей : справочное пособие в 6 томах. Том 4. Средства диагностирования (Книга 1)/ В.Д. Мигаль.—Х. :Майдан, 2012.—596 с.
8. Грачев В.В. Устройство для диагностирования дизеля / В. В. Грачев, А.П. Болдин. Авторское свидетельство СССР №1255889 от 06.02.1985, опубликовано 07.09.1986, БН №33
9. Григоров Н.И. Устройство для диагностирования дизеля / Н.И. Григоров, М.И. Загороднев, Б.Т. Кононов, С.Т. Поздняков, Б.Ф. Самойленко, К.Г. Сергеев, Ю.И. Стрелков. Авт. свид. СССР №1404867 от 21.11.1986. Опубликовано 23.06.1988. БН № 23.
10. Григоров Н.И. Устройство для оценки неравномерности работы цилиндров двигателя внутреннего сгорания / Н.И. Григоров, Б.Т. Кононов, В.З. Ройк, Б.Ф. Самойленко, К.Г. Сергеев, Ю.И. Стрелков, В.И. Терентьев. Авторское свидетельство СССР №1416882 от 19.09.1986. Опубликовано 15.08.1988. Бюл. № 30.
11. Григоров Н.И. Способ определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания / Н.И. Григоров, М.И. Загороднев, Б.Т.Кононов, В.З. Ройк, Б.Ф. Самойленко, К.Г.Сергеев, Ю.И.Стрелков. Авт. свид. СССР №1469384 от 20.08.1987. Опубликовано 30.03.1989, бюл. № 12.
12. Зайончковский В.Н. Устройство для определения неравномерности работы цилиндров двигателя внутреннего сгорания. / В.Н. Зайончковский, Е.Г. Заславский, Б.Т. Кононов, Б.Ф. Самойленко, А.Ю. Семенов, Ю.Н. Стрелков. Авторское свидетельство СССР №1474502 от 13.07.1987. Опубликовано 23.04.1989. Бюл. № 15.
13. Зайончковский В.Н. Устройство для определения неравномерности работы цилиндров двигателя внутреннего сгорания. / В.Н. Зайончковский, Е.Г. Заславский, Б.Т. Кононов, Ю.Н. Стрелков. Авторское свидетельство СССР №1590949 от 20.03.1988. Опубликовано 15.10.1990. Бюл. № 33.
14. Кононов Б.Т. Пристрій для оцінювання нерівномірності роботи циліндрів двигуна внутрішнього згорання / Б.Т. Кононов, О.А.Кононова, А.О.Нечаус, О.О. Ручка, В.М. Уваров. Патент України на корисну модель № 126897. Заявлено 01.02.2018, опубл. 10.07.2018, бюл. № 13.
15. Кононов Б.Т. Отметчик верхней мертвой точки в цилиндре двигателя внутреннего сгорания / Б.Т. Кононов, Л.М. Крутий, В.Г. Рыкун, В.Н. Терентьев. Авт. Свид. СССР №1063782 от 06.10.1982. Опубл. 30.12.1983. БН№48
16. Вихерт П.М. и др.. Конструкция и расчет автотракторных двигателей. – М.: Машиностроение, 1964. – 552 с.
17. Дизели. Справочник. Под ред. В.А. Ваншейдта и др. – Л.: Машиностроение, 1964. – 600 с.
18. Дизели. Справочник. Под общ. ред. В.А. Ваншейдта и др. – Л.: Машиностроение, 1977. – 480 с.
19. Орлин А.С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Конструкция и расчет поршневых и комбинированных двигателей. – М.: Машиностроение, 1972. – 464 с.
20. Белов П.М. и др. Двигатели армейских машин. Часть 2. Конструкция и расчет. – М.: Воениздат, 1972. – 561 с.

Received (Надійшла) 20.01.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2020

### Substantiation of requirements for modern methods and means of determining the general technical condition of gasoline and diesel engines of military power plants and power installations of weapons and military equipment

V. Kononov, O. Kononova, Yu. Musairova

**Abstract.** In this article the requirements for systems and devices of diagnostics of driving engines of military power plants and power installations of armored and autotractor engineering are considered, the necessity of taking into account additional indicators providing the necessary depth, completeness and efficiency of control is substantiated. Based on the example of the original technical solutions, methods and devices for estimating the technical state of internal combustion engines by determining the degree of non-uniformity of the angular rotational frequency are substantiated, which allows to evaluate the perfection of processes of conversion of chemical energy of fuel into heat and further into mechanical work, is not only the state of motion as well as the condition of its individual cylinders, the ways of improving the accuracy of the process of measuring the instantaneous angular rotation speed are considered, based on the refusal of performing the differentiation operation and on the introduction of systems of automatic phase frequency tuning in determining the speed and acceleration, organization of continuous measurements. It is proposed to perform measurements on the running engine and at the same time to obtain information on the status of each of the engine cylinders, use when measuring the shutdown of one of the working cylinders to evaluate its contribution to the resulting power output, taking into account in the process of testing the torsional vibrations that may occur in the system. affect the accuracy of determining the angular segments. It is suggested to use the technical solutions of the devices to evaluate the degree of unevenness of the engine, which allow to simplify the development of the devices being created.

**Keywords:** the driving engine of military equipment, diagnosis, the degree of irregularity of the angular rotation speed.

Л. І. Леві

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

## КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ КРАПЕЛЬНОМУ ЗВОЛОЖЕННІ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

**Анотація.** Системи крапельного зрошення широко використовуються для вирощування різноманітних сільськогосподарських культур як у теплицях, так і на відкритих ділянках різного розміру, від невеликих приватних садових ділянок до фермерських господарств. Особливість даного типу зрошення у тому, що вода повільно подається краплями або струменями у заданий час і у заданій кількості безпосередньо до коренів кожної рослини. При цьому витрата води зменшується на 20-50% у порівнянні з поверхневим поливом і дощуванням, попереджається надлишковий полив і внаслідок цього підняття рівня ґрунтових вод та засолення ґрунту, не ущільнюється верхня частина ґрунту, знижується рівень розростання бур'яну. При проведенні зрошення необхідно враховувати вплив випадково змінних погодних факторів і щоденно коригувати поливну норму. Структурна схема автоматизованої системи керування (АСК) вологозабезпеченості модульної ділянки за допомогою крапельного зрошення являє собою комбіновану систему керування з регулятором, який складається з двох послідовно з'єднаних ланок. Перша ланка визначає допустиму частку недополиву рослин у відсотках, враховуючи дані метеопрогнозу на наступний день. Очевидно, що допустима частка недополиву буде тим більша, чим більше значення прогнозованих опадів. Друга ланка обраховує завдання всмоктуючого тиску (вологості) на поточний день, враховуючи рекомендації першого регулятора, і подає керуючі впливи на виконавчі механізми. Метою статті є розробка методу керування вологістю ґрунту за допомогою крапельного зрошення на основі нечіткої логіки. Для визначення частки недополиву використано алгоритми нечіткої логіки. В якості вхідної змінної використовуються дані метеопрогнозу по опадах на наступний день. Вихідною змінною є допустима частка недополиву рослин на поточний день. Запропонована АСК вологозабезпеченості сільськогосподарських культур при крапельному зрошенні дозволяє підвищити точність керування вологістю завдяки оперативному врахуванню змінних збурень на об'єкт і забезпечити отримання планової врожайності при раціональному використанні енергетичних і водних ресурсів. Напрямок подальших досліджень слід вважати розробку концепції застосування інтелектуальних методів підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченості сільськогосподарських культур. Це дозволить економити водні та енергетичні ресурси з одночасним забезпеченням отримання планового врожаю.

**Ключові слова:** системи крапельного зрошення, автоматизована система керування вологозабезпеченості, алгоритми нечіткої логіки, терм-множини, лінгвістичні змінні, база нечітких лінгвістичних правил.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Системи крапельного зрошення широко використовуються для вирощування різноманітних сільськогосподарських культур як у теплицях, так і на відкритих ділянках різного розміру, від невеликих приватних садових ділянок до фермерських господарств.

Особливість даного типу зрошення у тому, що вода повільно подається краплями або струменями у заданий час і у заданій кількості безпосередньо до коренів кожної рослини.

При цьому витрата води зменшується на 20-50% у порівнянні з поверхневим поливом і дощуванням, попереджається надлишковий полив і внаслідок цього підняття рівня ґрунтових вод та засолення ґрунту, не ущільнюється верхня частина ґрунту, знижується рівень розростання бур'яну. При проведенні зрошення необхідно враховувати вплив випадково змінних погодних факторів і щоденно коригувати поливну норму [1 - 3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Структурну схему автоматизованої системи керування (АСК) вологозабезпеченості сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки за допомогою крапельного зрошення наведено на рис. 1, де введені такі позначення:

$W_z$  - задана вологість ґрунту,  
 $W$  - реальна вологість ґрунту,  
 $E_w = W_z - W$  - розузгодження,  
 $C_d$  - регулятор частки недополиву рослин,  
 $d$  - частка недополиву рослин,  
 $C_w$  - регулятор всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту,  
 $U_c$  - керуючий сигнал,  
 $AM$  - виконавчий механізм,  
 $RB$  - регулюючий орган, при цьому зазначимо, що у даному випадку об'єктом керування є модульна ділянка ґрунту,  
 $LE1$  - датчик появи дощу,  
 $ME1$  - датчик всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту,  
 $ME2$  - датчик вологості повітря,  
 $TE$  - датчик температури повітря,  
 $LE2$  - датчик опадів,  
 $RE$  - датчик освітленості,  
 $SE$  - датчик швидкості вітру.

Дана схема являє собою комбіновану систему керування з регулятором, який складається з двох послідовно з'єднаних ланок [4, 5]. Перша ланка визначає допустиму частку недополиву рослин у відсотках, враховуючи дані метеопрогнозу на наступний день.



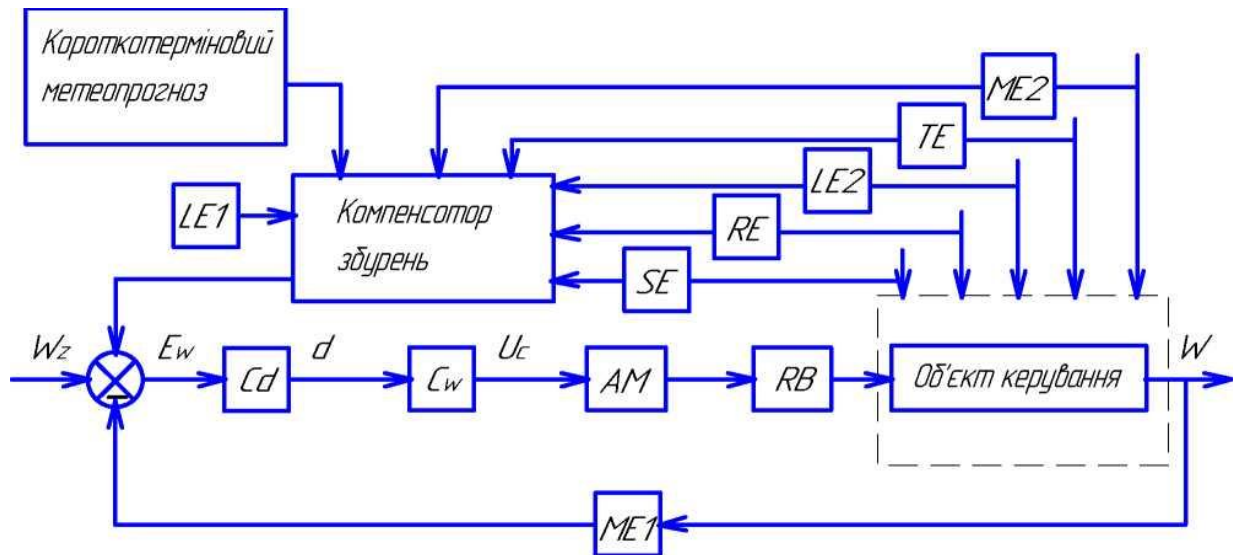


Рис. 1. Структурна схема АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки за допомогою крапельного зрошення

Очевидно, що допустима частка недополиву буде тим більша, чим більше значення прогнозованих опадів.

Друга ланка обраховує завдання всмоктуючого тиску (вологості) на поточний день, враховуючи рекомендації першого регулятора, і подає керуючі впливи на виконавчі механізми. При цьому повинна виконуватися нерівність:

$$W > W_{wilting} + \delta_1, \quad (1)$$

де  $W$  – вологість ґрунту,  
 $W_{wilting}$  – вологість зав'ядання рослин,  
 $\delta_1$  – гістерезис (певний резерв).

Тобто, вологість ґрунту повинна триматися в межах:

$$W \in [W_{wilting} + \delta_1; W_z]. \quad (2)$$

Допустима частка недополиву при цьому становить:

$$\delta \in [0; W_z - (W_{wilting} + \delta_1)]. \quad (3)$$

Оскільки величина заданої вологості  $W_z$  залежить від виду рослини і фази її розвитку, тобто змінюється в часі, то зручніше спочатку визначати величину недополиву у відсотках ( $x, \%$ ), а потім переводити в абсолютні одиниці за такою залежністю (4):

$$\delta = \frac{x \cdot (W_z - W_{wilting} - \delta_1)}{100}, \text{ мм.} \quad (4)$$

Вираз (4) є однаковим для всіх видів рослин і фаз їх розвитку. Змінюватиметься лише значення  $W_z$ .

**Метою статті** є розробка методу керування вологістю ґрунту за допомогою крапельного зрошення на основі нечіткої логіки.

### Основна частина

Для визначення частки недополиву  $x, \%$  пропонується використовувати алгоритми нечіткої логіки [6-12].

В якості вхідної змінної використовуються дані метеопрогнозу по опадах на наступний день. Вихідною змінною є допустима частка недополиву рослин на поточний день.

У якості терм-множини вхідної лінгвістичної змінної будемо використовувати нижче наведену множину

$$T_1 = \{\text{“дуже мала кількість опадів”, “невеликі опади”, “помірні”, “сильні”, “дуже сильні”}\}, \quad (5)$$

або у символічному вигляді

$$T_1 = \{NB, NS, Z, PS, PB\} \quad (6)$$

з функціями належності, зображеними на рис. 2.

У якості терм-множини вихідної лінгвістичної змінної (величина недополиву у %) будемо використовувати множину

$$T_2 = \{\text{“дуже мала”, “невелика”, “середня”, “велика”, “дуже велика”}\}, \quad (7)$$

або у символічному вигляді

$$T_2 = \{NB, NS, Z, PS, PB\} \quad (8)$$

з функціями належності, зображення котрих наведено на рис. 3.

База нечітких лінгвістичних правил для визначення допустимої частки недополиву рослин наведено у табл. 1.

З даної таблиці бачимо, що чим сильніші прогнозуються опади, тим на більшу величину  $\delta$  можна недополити рослини.



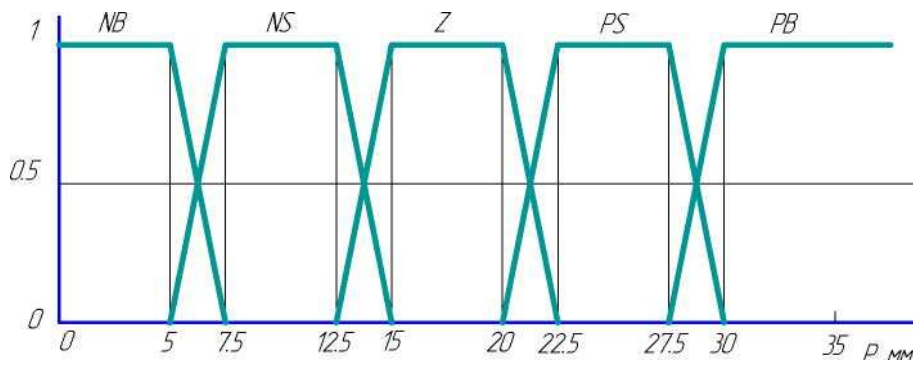


Рис. 2. Функції належності змінної «прогнозована кількість опадів»

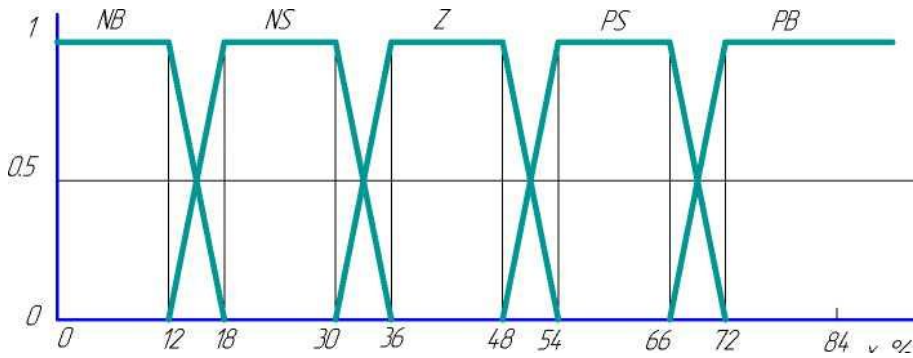


Рис. 3. Функції належності змінної «частка недополиву»

Таблиця 1 - База нечітких лінгвістичних правил для визначення частки недополиву рослин при крапельному зрошенні

Прогнозована кількість опадів Р, мм	Частка недополиву рослин x, %
NB	NB
NS	NS
Z	Z
PS	PS
PB	PB

Крім опадів, на об'єкт керування (ділянку ґрунту) впливають наступні збурення: сонячна радіація, вітер, температура повітря, відносна вологість повітря.

Впливаючи на випаровування з поверхні рослин та ґрунту, приведені збурення впливають на водоспоживання, а, отже, і на результуючу вологість ґрунту. Дані параметри не входять безпосередньо у базу нечітких лінгвістичних правил, але враховуються системою керування. Так, наприклад, ми недополили рослини у день  $k$  на величину  $PS$ , розраховуючи на сильні опади у день  $(k+1)$ . Насправді величина опадів потрапила у діапазон  $Z$ , був помірний вітер і висока температура повітря. В результаті

$$W_{k+1} \neq W_{z, k+1}.$$

Враховуючи прогноз по опадах на день  $(k+2)$ , буде здійснено полив, який компенсує

збурення по температурі, сонячній радіації, нестачі опадів та інші збурення у день  $(k+1)$ .

Для синтезу системи нечіткого виведення використано редактор Fuzzy Logic Toolbox системи Matlab [13, 14]. Розрахунок завдання для АСК вологістю ґрунту при крапельному зрошенні здійснюється щодобово.

При появі дощу полив необхідно зупинити, а після його закінчення знову здійснити перерахунок завдання. Полив потрібно здійснювати водою певної температури, тому у структурі системи зрошення передбачена накопичувальна ємність, де вода буде нагріватися під дією сонячної радіації. З метою мінімізації експлуатаційних витрат ємність наповнюється водою у періоди доби, коли електроенергія найдешевша.

### Висновки

Запропонована АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному

зрошенні дозволяє підвищити точність керування вологістю завдяки оперативному врахуванню змінних збурень на об'єкт і забезпечити отримання планової врожайності при раціональному використанні енергетичних і водних ресурсів.

Напрямок подальших досліджень слід вважати розробку концепції застосування інтелектуальних методів підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур.

Це дозволить економити водні та енергетичні ресурси з одночасним забезпеченням отримання планового врожаю.

Це дозволить економити водні та енергетичні ресурси з одночасним забезпеченням отримання планового врожаю.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Леві Л.І. Моделювання залежностей «багатовимірний вхід – вихід» для автоматизації процесів керування в умовах невизначеності. Вісник ПДАА. 2015. № 4. С. 86 – 90.
2. Леві Л.І. Використання нечіткої логіки для автоматизації функціонування зрошувальних систем. Вісник ПДАА. 2018. № 2. С. 153 – 157. DOI 10.31210/visnyk2018.02.25
3. Леві Л.І. Синтез автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового зволоженні. Вісник ПДАА. 2019. № 1. С. 227–231. DOI 10.31210/visnyk2019.01.27
4. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. / Е.И. Юревич – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.
5. Гребеннік І.В. Методи прийняття рішень / О.Г. Наконечний, І.В. Гребеннік, Т.Є. Романова, А.Д. Тевяшев. - Харків: ХНУРЕ, 2016. - 132 с.
6. Борисов В.В. Нечёткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Крутлов, А.С. Федулов. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
7. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский: Пер. с польского И.Д. Рудинского. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. – 452 с.
8. Кучук Г.А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка / ГА Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 5 (45). – С. 74-84.
9. 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.
10. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. (2019), “Improving Big Data Centers Energy Efficiency: Traffic Based Model and Method”, In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kasprzyk 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)
11. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Mozhaiev, M., Kuchuk, H. (2017), “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: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>
12. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин – Москва: Горячая линия – Телеком, 2004. – 143 с.
13. Згуровский М.З. Основы вычислительного интеллекта / М.З. Згуровский, Ю.П. Зайченко. — К.: Наук. думка, 2013. — 406 с.
14. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Леоненков. - Санкт Петербург: БХВ-Петербург, 2005. - 719 с.

Received (Надійшла) 24.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.05.2020

### Water supply management of agricultural cultures with dropping hydrogen

L. Lievi

**Abstract.** Drip irrigation systems are widely used to grow a variety of crops both in greenhouses and in open areas of varying sizes, from small private garden areas to farms. The peculiarity of this type of irrigation is that water is slowly supplied with drops or jets at a given time and in a given amount directly to the roots of each plant. In this case, water consumption is reduced by 20-50% compared to surface irrigation and sprinkling, redundant irrigation is prevented and, as a result, raising the groundwater level and salinization of the soil, the top of the soil is not compacted, and the level of weed growth is reduced. Irrigation should take into account the influence of randomly varying weather factors and adjust the irrigation rate daily. Structural diagram of the automated control system (ACS) of the moisture supply of the modular section by means of drip irrigation is a combined control system with a controller, which consists of two series-connected units. The first link determines the permissible percentage of under-consumed plants as a percentage, based on the next day's weather data. Obviously, the more permissible the share of imperfections will be, the greater the value of predicted precipitation. The second link calculates the intake pressure (humidity) task for the current day, taking into account the recommendations of the first regulator, and provides control effects on the actuators. The purpose of the article is to develop a method for controlling soil moisture by drip irrigation based on fuzzy logic. Fuzzy logic algorithms were used to determine the fraction of imperfectly. Weather input data for next day precipitation are used as input variable. The baseline variable is the permissible proportion of underexposed plants for the current day. The proposed ACS of moisture of crops at drip irrigation allows to increase the accuracy of humidity management by promptly taking into account variable perturbations on the object and to ensure the planned yield with rational use of energy and water resources. The direction of further research should be considered the development of the concept of application of intelligent decision support methods in multicriteria conditions in the problems of optimal management of moisture content of crops. This will save water and energy resources while ensuring planned yields.

**Keywords:** drip irrigation systems, automated moisture management system, fuzzy logic algorithms, term sets, linguistic variables, fuzzy linguistic rules base.

О. А. Макогон, С. М. Губа, С. І. Машенко, О. М. Горбов, О. В. Мартиненко, І. О. Ковальов  
Військовий інститут танкових військ НТУ “ХП”, Харків, Україна

## ВИБУДОВУВАННЯ ЧАСОВОЇ ПРЯМОЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЗРАЗКА ТАНКА Т-64Б ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ЙОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є життєвий цикл зразка танка Т-64Б. Метою дослідження є визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування зразка танка Т-64Б, його складальних одиниць та систем. **Задачі:** визначити закон надійності та аналітичні залежності між ймовірністю безвідмовної роботи та інтенсивністю відмов окремих складальних одиниць та систем танків Т-64Б; проаналізувати середнє напрацювання на відмову окремих складальних одиниць та систем танків Т-64Б, які експлуатувалися в навчально-бойовій групі у період від нормальної експлуатації до старіння і капітального ремонту; провести коригування термінів чергового технічного обслуговування; вибудувати часову пряму життєвого циклу зразка Т-64Б на основі оптимізації циклу технічного обслуговування і ремонту. Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. Отримані такі **результати.** Були досліджені статистичні дані наробітки на відмову складальних одиниць та систем танків Т-64Б, які експлуатувалися в навчально-бойовій групі у період від нормальної експлуатації до капітального ремонту. За результатами дослідження обраховані оптимальні строки технічного обслуговування систем зразка танку Т-64Б до капітального ремонту. Пропонується цикл технічних обслуговувань зразка Т-64Б протягом його життєвого циклу сприятиме збільшенню загального часу експлуатації зразка Т-64Б збільшився на 4% за період від початку нормальної експлуатації до технічного обслуговування -2. **Висновки.** Термін чергового технічного обслуговування може бути визначений як інтервал часу знаходження об'єкта в працездатному стані із заданою ймовірністю. Ймовірності часу напрацювання до відмови вузлів та систем зразка танка Т-64Б у період життєвого циклу до капітального ремонту є випадковою величиною, яка підкорена закону Вейбулла, при наближенні його до експоненціального закону у період нормальної експлуатації до старіння і капітального ремонту. Аналітичні залежності між ймовірністю безвідмовної роботи і інтенсивністю відмов дають змогу визначити оптимальні строки технічного обслуговування систем зразка танку Т-64Б до капітального ремонту та необхідного достатнього часу експлуатації машини при заданій надійності. Вибудування часової прямої життєвого циклу зразка техніки на основі оптимізації циклу технічного обслуговування і ремонту сприятиме підтриманню на нормативному рівні показників експлуатаційної надійності протягом всього його життєвого циклу з одночасним скороченням матеріальних, трудових та фінансових витрат.

**Ключові слова:** технічне обслуговування і ремонт бронетанкового озброєння і техніки, життєвий цикл зразка техніки, закон надійності.

### Постановка проблеми та завдання дослідження

Забезпечення високих показників надійності бронетанкового озброєння і військової техніки (БТОТ), модернізація та продовження термінів служби існуючого парку БТОТ, розвиток чинної системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) можна вважати пріоритетними напрямками розвитку Збройних Сил України (ЗСУ).

Науково обґрунтована за відповідними критеріями раціональна форма організації та виконання їх ТО і Р є головною передумовою забезпечення необхідного рівня експлуатаційної надійності ОБТ.

Сучасний танк являє собою складну систему, що є сукупністю сумісно діючих елементів – вузлів, механізмів, з'єднань та агрегатів, які забезпечують виконання ним завдань за призначенням. Справність і готовність танка до використання за призначенням забезпечуються його технічними станом. Зміни технічного стану зразка БТОТ та його складальних одиниць і систем в процесі експлуатації пов'язані з впливом на нього різних механічних, фізичних та кліматичних факторів. Технічна експлуатація має на меті визначити раціональний набір діагностичних та профілактичних операцій, що дозволяє оцінити трудомісткість технічного обслуговування, здійснювати планування постів та персона-

лу. Встановлення оптимальної періодичності ТО дозволить знизити трудомісткість поточного ремонту, кількість операцій та час простою БТОТ.

Вищевказане свідчить про **актуальність** дослідження та необхідність встановлення оптимальної періодичності ТО дозволить знизити трудомісткість поточного ремонту, кількість операцій та час простою БТОТ.

Підтримання на нормативному рівні показників експлуатаційної надійності зразка БТОТ протягом всього його життєвого циклу з одночасним скороченням матеріальних, трудових та фінансових витрат було і залишається актуальним завданням у технічній політиці ЗСУ України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** стосовно зазначених вище питань засвідчує актуальність цієї проблематики.

Зазвичай, кількість та трудомісткість операцій при різних видах технічного обслуговування БТОТ як і сама періодичність ТО визначена керівними документами [1–3]. Однак, існуюча система техобслуговування в сучасних умовах мало ефективна і морально застаріла. Основними її недоліками будемо вважати такі: періодичності проведення та обсягів робіт ТО є завищеними і не задовольняють вимогам їх мінімальної необхідності для підтримання необхідного рівня технічного стану БТОТ; недостатня обґрунтованість значень діагностичних параме-

трів складальних одиниць та системи зразка техніки, параметрів обслуговування та періодичності його проведення; стратегії та види ТО є єдиними для зразків техніки різного цільового призначення; відсутні операції, які виконуються за технічним станом; при організації технічного обслуговування, не в повній мірі враховують специфічні особливості й фактори, що впливають на надійність зразка техніки або її окремих складальних одиниць і систем; не в повній мірі враховується допустимий час проведення ТО та відновлення працездатності об'єкта [4–7].

**Метою статті** є визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування зразка танка Т-64Б, його складальних одиниць та систем. Для досягнення поставленої мети визначені **завдання дослідження**:

– визначити закон надійності та аналітичні залежності між ймовірністю безвідмовної роботи та інтенсивністю відмов окремих складальних одиниць та систем танків Т-64Б;

– проаналізувати середнє напрацювання на відмову окремих складальних одиниць та систем танків Т-64Б, які експлуатувалися в навчально-бойовій групі у період від нормальної експлуатації до капітального ремонту;

– провести корегування термінів чергового ТО;

– вибудувати часову пряму життєвого циклу зразка Т-64Б на основі оптимізації циклу ТО і Р.

### Виклад основного матеріалу

**Закон надійності та аналітичні залежності між ймовірністю безвідмовної роботи та інтенсивністю відмов окремих складальних одиниць та систем зразка танка Т-64Б.** З урахуванням індивідуальних властивостей конкретної машини, умов її експлуатації, характеру та графіка навантаження, інших факторів темп зносу як окремих вузлів і деталей так і підсистем танка може помітно відрізнятися від показників, визначених для об'єкта-аналога. Тобто, в результаті техобслуговування можуть проводитися до вичерпання запасу працездатності агрегатів, або збільшиться число відмов, що вимагають аварійно-відновлювальних ремонтів. В тому і в інших випадках збільшуються матеріальні втрати, пов'язані з необґрунтованими витратами на ремонт ще працездатного обладнання або ж з неплановими витратами на відновлення після відмови, що як наслідок, призводить до зниження боєготовності техніки, в цілому.

Для вирішення зазначеної проблематики автори пропонують скористатися методикою коригування термінів технічного обслуговування об'єктів протягом життєвого циклу об'єкту з використанням інформації про надійність його окремих складальних одиниць та систем.

В основі методики лежить залежність між ймовірністю безвідмовної роботи і інтенсивністю відмов.

Ймовірність знаходження об'єкта в працездатному стані на планований інтервал напрацювання  $\tau_n$  будемо визначати за формулою експоненціального закону розподілення

$$P(\tau_I + \tau_n) = \exp \left[ - \frac{\tau_I + \tau_n}{\int_0^{\tau_I + \tau_n} \lambda(t) dt} \right], \quad (1)$$

де  $\tau_I$  – напрацювання об'єкта до моменту проведення останнього технічного обслуговування;

$\lambda(t)$  – інтенсивність відмов.

Інтервал часу  $\tau_n$  фактично визначає термін чергового технічного обслуговування, проведення якого забезпечить збереження працездатного стану об'єкта із заданою ймовірністю.

Цю ймовірність можна виразити через умовну ймовірність знаходження об'єкта в працездатному стані:

$$P_{зад} = P(\tau_I / \tau_n) = \exp \left[ - \frac{\tau_I + \tau_n}{\tau_I} \int_0^{\tau_n} \lambda(t) dt \right], \quad (2)$$

де  $P_{зад}$  – визначене (директивне) значення ймовірності безвідмовної роботи об'єкта.

Після логарифмування маємо

$$\ln P_{зад} = - \frac{\tau_I + \tau_n}{\tau_I} \int_0^{\tau_n} \lambda(t) dt. \quad (3)$$

Якщо шляхом статистичної обробки результатів контролю за безвідмовністю об'єктів отримано нове значення інтенсивності відмов  $\lambda_{нов}(t)$  і є підстави вважати, що це нове значення протягом планового напрацювання  $\tau_n$  не зміниться  $\lambda_{нов}(t) = \lambda$ , то з останнього виразу випливає

$$\ln P_{зад} = -\lambda \cdot \tau_n. \quad (4)$$

Звідки

$$\tau_n = - \frac{1}{\lambda} \ln P_{зад}. \quad (5)$$

Таким чином, при відомому законі надійності об'єкта та наявності директивного терміну технічного обслуговування (ремонту)  $T_p$  можна визначити час чергового ремонту за формулою

$$T_n = \int_0^{T_p} P(t) dt, \quad (6)$$

де  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи об'єкта [8].

**Аналіз середнього напрацювання на відмову окремих складальних одиниць та систем зразка танка Т-64Б та коригування термінів чергового ТО.** Середнє напрацювання на відмову складальних одиниць зразка танка Т-64Б, які експлуатувалися в навчально-бойовій групі у період від нормальної експлуатації до капітального ремонту наведені, в табл. 1.

Оптимальні строки ТО окремих систем Т-64Б, обраховані згідно запропонованої методики надані в табл. 2.

Таблиця 1 – Середнє напрацювання на відмову складальних одиниць зразка танка Т-64Б

Основні складальні одиниці	Середнє напрацювання на відмову за рік	Ресурс	Час до капітального ремонту, рік
Ходова частина (ХЧ)	3000 км	7000 км	≈2,3
Двигун	230-285 год.	500 год.	≈2,0
Пушка	60-80 пострілів	700 пострілів	≈6-7
Стабілізатор	24 год.	250 год.	≈10-11

Таблиця 2 – Оптимальні строки ТО систем зразка танку Т-64Б до капітального ремонту

Найменування систем зразка танка Т-64Б	$T_{cp}$ , год	$\lambda$	$Q(T_p)$	$T_p$ , год	$T_n$ , год
СУВ	1100	0,0001	0,82	230	160
СУ	400	0,0025	0,6	250	240
ЕСО	1500	0,00067	0,64	1700	600
Т і ХЧ	510	0,004	0,79	420	107
СП	140	0,0071	0,74	400	89

Статистичному дослідженню підлягали такі системи:

- системи управління вогнем (СУВ);
- силова установка (СУ);
- електроспецобладнання (ЕСО);
- трансмісія і ходова частина (Т і ХЧ);
- система повітреочистки (СП).

При розрахунках було зроблені припущення, що всі відмови були однократними та відбувалися незалежно одна від одної.

Крім того, вважалося, що відмови, які виникають у системі зразка техніки, проявляються миттєво; а після закінчення будь-якого виду відновлювальних робіт початкові властивості об'єкта повністю відновлюються [9].

Результати дослідження проілюстровані рис. 1.

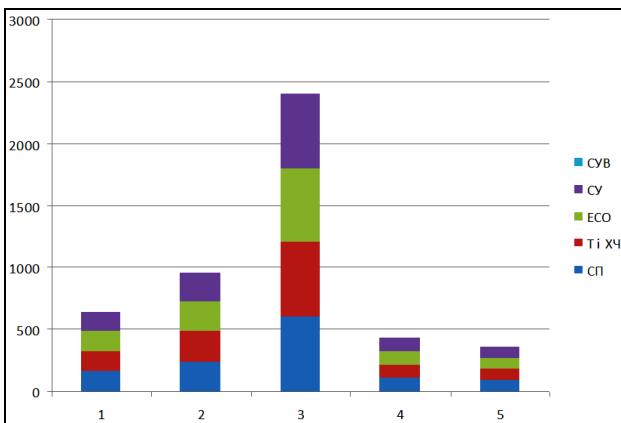


Рис. 1. Оптимальні терміни ТО зразка танка Т-64Б до капітального ремонту

Природно вважати, що в терміни від початку експлуатації до капітального ремонту оптимальний строк ТО зразка техніки  $T_{zp}^*$  обчислюється як найменше спільне кратне  $T_{ni}^*$  кожної його системи

$$T_{zp}^* = \text{НОК} \left( T_{ni}^* \right). \quad (7)$$

$$T_{zp}^* = \text{НОК} (160, 240, 600, 107, 89) \approx \text{НОК}(160, 240, 600, 100, 80) = 2400. \quad (8)$$

Зазначимо про необхідність округлення простих чисел до складових при проведенні розрахунків для отримання результатів, які знаходяться в межах реальних значень. Результати дослідження можуть бути використані для вибудовування часової прямої життєвого циклу зразка танка Т-64Б, рис. 2.

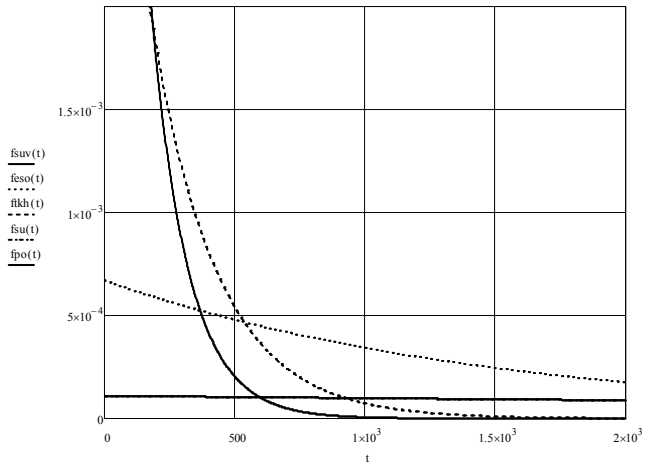
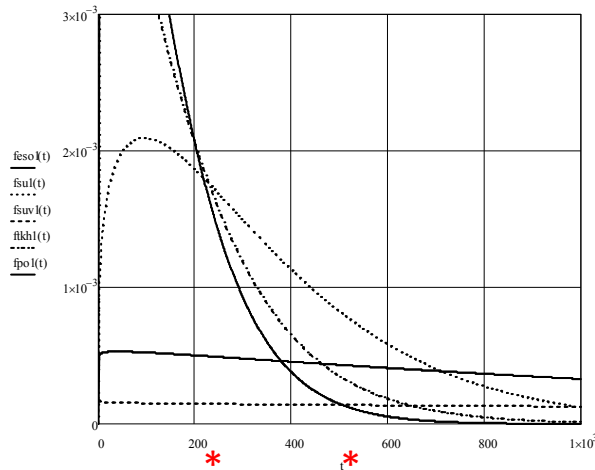


Рис. 2. Щільність ймовірності часу напрацювання до відмови вузлів та систем зразка танка Т-64Б у період нормальної експлуатації  
1 – електроспецобладнання; 2 – силової установки; 3 – система управління вогнем; 4 – трансмісія та ходова частина; 5 – система повітреочистки

Як видно із рисунка, найімовірніший збіг відмов припадає на період експлуатації з 520 до 800 годин роботи зразка техніки. Саме цей період експлуатації пропонується вважати оптимальним для проведення ТО.

За період експлуатації зразка техніки у період від “обкатки” до капітального ремонту щільність

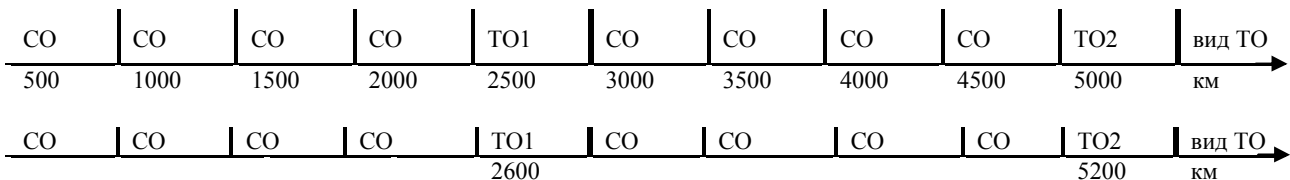
ймовірності відмов вузлів та систем зразка Т-64Б проілюстрована рис. 3.



**Рис. 3.** Щільність ймовірності відмов вузлів та систем зразка танка Т-64Б у період життєвого циклу:  
1– електроспецобладнання; 2– силова установка;  
3 – система управління вогнем; 4– трансмісія та ходова частина; 5 – система повітреочистки

З рис. 3 випливає, що різні вузли агрегати та системи танка Т-64Б мають різне математичне очікування часу напрацювання до відмови і, відповідно, ймовірність безвідмовної роботи. Враховуючи, що ймовірність безвідмовної роботи обчислюється виразом

$$P_g(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, \quad (9)$$



**Рис. 4.** Цикл технічних обслуговувань зразка Т-64Б а) існуючий; б) пропонуємий

З рис. 4 видно, що загальний час експлуатації зразка Т-64Б збільшився на 3,94% за період від початку нормальної експлуатації до ТО-2.

Час напрацювання на відмову до капітального ремонту зразка танка Т-64Б протягом життєвого циклу також є випадковою величиною, підкореною закону Вейбулла.

Параметри закону свідчать про наближеність його до нормального (рис. 5). Як видно з рисунку, математичне сподівання  $m_n > m_{KP1} > m_{KP2}$  [10, 11].

**Висновки**

1. Термін чергового технічного обслуговування може бути визначений як інтервал часу знаходження об'єкта в працездатному стані із заданою ймовірністю.

2. Ймовірності часу напрацювання до відмови вузлів та систем зразка танка Т-64Б у період життєвого циклу до капітального ремонту є випадковою величиною, яка підкорена закону Вейбулла, при

де  $\lambda(t)$  – інтенсивність відмов, можна визначити необхідно-достатній час експлуатації техніки при заданій надійності  $P_g(t) = P_g^{zad}$  для кожного вузлів та систем зразка Т-64Б.

Так,  $P_{gno}^{zad} = 0,95$  для системи повітреочистки відповідає значенню часу  $t_{no} = 95$  годин.

Зазначимо, що ймовірності часу напрацювання до відмови вузлів та систем зразка танка Т-64Б у період життєвого циклу до капітального ремонту є випадковою величиною, яка підкорена закону Вейбулла, при наближенні його до експоненціального закону у період нормальної експлуатації до капітального ремонту.

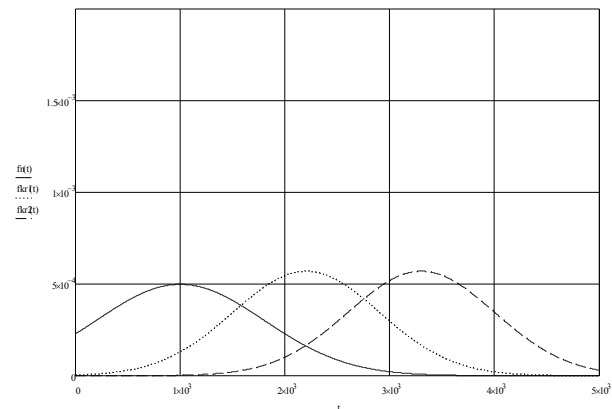
Аналогічні розрахунки були проведені для інших систем танка Т-64Б. Розбіжності розрахунків із даними, наведеними у табл. 2 знаходяться в межах 5%.

Враховуючи, геометричний смисл ймовірності безвідмовної роботи шляхом зіставлення рівновеликих величин  $P_{vi}^{zad}$  для кожної і-ї системи танку можна визначити оптимальний час ТО машини

$$T_{зр}^* = \arg \{ P_{ПО}^{zad} \approx P_{СУВ}^{zad} \approx P_{СУ}^{zad} \approx P_{ЕСО}^{zad} \approx P_{ТХЧ}^{zad} \}. \quad (10)$$

За результатами розрахунків при  $P_i^{zad} = 0,92...0,95$ ,  $i = \overline{1,5}$  отримано значення  $T_{зр1}^* = 260$  год та  $T_{зр2}^* = 800$  год роботи. Доцільність проведення у такі терміни життєвого циклу машини проілюстровані на рис. 3 позначкою (\*) та рис. 4.

наближенні його до експоненціального закону у період нормальної експлуатації до старіння і капітального ремонту.



**Рис. 5.** Час напрацювання на відмову до капітального ремонту зразка танка Т-64Б протягом життєвого циклу



3. Аналітичні залежності між імовірністю безвідмовної роботи і інтенсивністю відмов дають змогу визначити оптимальні строки технічного обслуговування систем зразка танку Т-64Б до капітального ремонту та необхідно-достатній час експлуатації машини при заданій надійності.

4. Вибудування часової прямої життєвого циклу зразка техніки на основі оптимізації циклу ТО і

Р сприятиме підтриманню на нормативному рівні показників експлуатаційної надійності протягом всього його життєвого циклу з одночасним скороченням матеріальних, трудових та фінансових витрат.

За результати дослідження, застосування запропонованої методики дозволить збільшити час безвідмовної роботи зразка танка Т-64Б на 3,9%.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Керівництво з організації експлуатації та ремонту бронетанкового озброєння та техніки у ЗС України на мирний час [Електронний ресурс] : Наказ Міністра оборони України від 25.12.2009 № 665 // Законодавство України / LIGA ZAKON. URL : <http://www.search.ligazakon.ua/doc2.nsf/link1/RE29927.html>
2. Про затвердження Керівництво щодо перевірки та оцінки стану озброєння та військової техніки у Збройних Силах України [Електронний ресурс] : Наказ Міністра оборони України від 05.03.2004 № 74 // Сайт Міністерства оборони України / Нормативна правова база. URL : <http://da.coolreferat.com.ua/nuda/nakaz-74-pro-zatverdjenya-kerivnictva-shodo-perevirki-ta-ocin/main.html>.
3. Про затвердження Керівництва з забезпечення військових частин парковим обладнанням для технічного обслуговування ОВТ [Електронний ресурс] : Наказ Міністра оборони України від 16.12.2011 року № 772// Сайт Міністерства оборони України / Нормативна правова база. URL : <http://www.mil.gov.ua/ministry/normativno-pravova-baza/nakazi-ministra-oboroni-ukraini/>
4. Волох Олександр Петрович. Методика обґрунтування раціональних значень параметрів технічного обслуговування машин інженерного озброєння при їх використанні за призначенням : дис... канд. техн. наук: 20.02.14 / Військовий інженерний ін-т Подільського держ. аграрно-технічного ун-ту. – Кам'янець-Подільський, 2007. – 182 с.
5. Стратегії технічного обслуговування і ремонту озброєння та військової техніки “за станом” / М. В. Чорний, Р. В. Долгов, Р. Г. Будяну // Військово-технічний збірник. Львів, Львівський інститут Сухопутних військ, 2009 – № 1. – С. 65-68.
6. Смирнов Н. Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Н. Н. Смиронов, А. А. Ицкевич. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.
7. Ланецкий Б.Н. Обоснование оптимальных стратегий технического обслуживания и ремонта сложных технических систем / Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьянчук, Д.В. Фоменко // Системи обробки інформації – № 6 (80) – Харків : ХУПС, 2009. – С. 72 – 78.
8. Семенов А. А., Мелкумян В. Г. Основи теорії надійності: Навчальний посібник. — К.: КМУЦА, 1998. – 84 с.
9. Центр дослідження армії, конверсії та роззброєння / [Електронний ресурс]. URL: <http://cacds.org.ua/ru/activities/>.
10. Теория вероятностей : учебник / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, Физматгиз, 1969 – 576 с.
11. Исследование операций / Е. С. Вентцель – М.: Советское радио, 1972. – 552с.

Received (Надійшла) 20.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.04.2020

### Building a time line for the tank t-64b sample lifecycle and determination of the optimal periodicity of its maintenance

H. Makogon, S. Guba, S. Mashchenko, O. Horbov, O. Martynenko, I. Kovalev

**Abstract.** The subject matter of the article is the T-64B sample life cycle. The **goal** of the study is to determinate the optimal maintenance period of the T-64B sample tank, its assembly units and systems. **The tasks** to be solved are: to determine the reliability law and analytical dependencies between the probability of failure-free operation and the failure rate of individual assembly units and T-64B tank systems; to analyze the average failure time of individual units and systems of T-64B tanks operated in the training-combat group during the period from normal operation to aging and overhaul; to adjust the time of regular maintenance; to build a time line of the T-64B sample life cycle based on the optimization of its maintenance and repair cycle. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The following **results** are obtained. The statistics on the failure of the assembly units and systems of the T-64B tanks operated in the training-combat group during the period from normal operation to aging and overhaul, were investigated. The proposed maintenance cycle of the T-64B sample over its life cycle will increase the total life of the T-64B sample by 4% over the period from the start of normal operation to the Maintenance -2. **Conclusions.** The term regular maintenance can be defined as the time interval of the facility in working condition with a certain probability. The probabilities of time to failure of units and systems of the T-64B sample tank during the life cycle to overhaul is a random variable that obeys the Weibull law as it approaches exponential law during normal operation and aging and overhaul. Analytical dependencies between the probability of failure-free operation and failure rate make it possible to determine the optimal time for maintenance of the T-64B tank sample systems before overhaul and need-sufficient time of operation of the machine at a given reliability. Building a time line for the sample equipment lifecycle based on optimization of the maintenance and repair cycle will help maintain sustainability performance throughout its life cycle while reducing material, labor, and financial costs.

**Keywords:** maintenance and repair of armored weapons and equipment, the lifecycle of the sample equipment, the reliability law.

В. І. Носков<sup>1</sup>, В. С. Блиндюк<sup>2</sup>, М. В. Мезенцев<sup>1</sup>, Г. В. Гейко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

## ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ ТА ЇЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ КОЛІСНОЇ МАШИНИ

**Анотація.** Предметом статті є дослідження трансмісій і систем управління спеціальних колісних машин та їх порівняльний аналіз. Проведена робота показала, що основним типом трансмісії, яка застосовується в колісних машинах спеціального призначення є гідромеханічна трансмісія, яка має ряд переваг. Але, в той же час, їй притаманні певні недоліки. Останнім часом намітилася тенденція переходу до електромеханічної трансмісії, яка перевершує гідромеханічну по економічності, регульовальним властивостям і компоновальною гнучкістю. З'являється можливість в кожному колесі мати тяговий електродвигун (мотор-колесо). Виконано порівняння різних виконань електромеханічної трансмісії. З урахуванням наявних напрацювань і досвідом експлуатації асинхронних тягових двигунів на рухомому складі, зроблено висновок про його найбільш реальну застосовність в трансмісіях колісної машини. Для колісної машини спеціального призначення пропонується використання електромеханічної трансмісії з асинхронними тяговими двигунами, мікропроцесорною системою управління та накопичувачем енергії.

**Ключові слова:** електромеханічна трансмісія, система управління трансмісії, накопичувач енергії.

### Вступ

Сучасні спеціальні колісні машини (СКМ) повинні надійно працювати при різних дорожніх та кліматичних умовах і володіти високими параметрами маневреності та економічності. При цьому вчені та конструктори постійно вирішують науково-технічні задачі, які спрямовані на підвищення тактико-технічних характеристик СКМ. Рішення даних задач можливе за рахунок якісного поліпшення конструкції енергетичної установки і конструкції трансмісії. Слід зазначити, що, як правило, в даний час на всіх СКМ застосовується дизельний двигун, який найбільш задовольняє за сукупністю ряду вимог, тому останнім часом модернізацію СКМ виробляють за рахунок розробки трансмісій з найкращими параметрами. Таким чином, науково-технічні задачі дослідження та вдосконалення конструкцій трансмісій для СКМ є актуальними і в даний час.

**Аналіз літератури.** Трансмісія сучасної СКМ являє собою сукупність вузлів, які пов'язують колінчастий вал двигуна з ведучими колесами машини для передачі потужності, що виробляється двигуном, і розподілу її між провідними колесами. В першу чергу вона повинна забезпечувати високі тягово-швидкісні та паливо-економічні характеристики, високий коефіцієнт корисної дії (ККД), мінімальні габаритні розміри і вагу, високу надійність в експлуатації, малий обсяг обслуговування та ремонтпридатність [1]. У зв'язку з цим вченими і конструкторами розроблено, досліджено та впроваджено велику різноманітність конструкцій трансмісій. При цьому, для забезпечення підвищеної прохідності та маневреності на СКМ впроваджують тільки ті конструкції трансмісій, які роздають потік потужності на всі колеса. Також частина типів трансмісій не підходять через потужність дизельного двигуна, що застосовується на СКМ [2, 3].

Основним типом трансмісії, яка застосовується на колісних машинах спеціального призначення, є гідромеханічна (ГМТ). Останнім часом намітилася

тенденція переходу до електромеханічної трансмісії (ЕМТ). Вибір типу трансмісії та її системи управління (СУ) розглядається як рішення багатofакторної задачі, яка враховує призначення машини, умови експлуатації, необхідні тягові та гальмові характеристики, показники надійності, витрату палива та ряд інших чинників.

ГМТ являє собою єдиний агрегат, який складається з узгоджувальної передачі, гідротрансформатора, коробки передач з фрикційними муфтами, гідродинамічного гальма-уповільнювача та вузлів гідравлічної системи. Структурна схема ГМТ для чотирьохколісної машини з приводом на два колеса наведена на рис. 1 [4].



Рис. 1. Структурна схема гідромеханічної трансмісії з приводом на два колеса

ГМТ, у порівнянні з ЕМТ, має меншу металомісткість, виключає споживання кольорових металів, що входять до складу тягових генераторів і електродвигунів. У той же час, необхідність забезпечення високих тягових властивостей машини вимагає установку з гідротрансформатором додаткової коробки передач. Система управління перемиканням та блокуванням гідротрансформатора включає в



себе виконавчі та регулюючі механізми гідросистеми та електронний блок управління, який взаємопов'язаний з електронним блоком управління двигуна (дизеля).

При збільшенні навантаження на машину різко знижується ККД гідротрансформатора, тому діапазон економічного регулювання моменту у гідротрансформаторі виявляється значно нижче необхідного. ККД механічної частини трансмісії визначається як

$$\eta_m = \eta_{гмт} + \eta_{пм}, \quad (1)$$

де  $\eta_{гмт}$  – ККД ГМТ,  $\eta_{пм}$  – ККД провідного моста;

$$\eta_{пм} = \eta_o \eta_k; \quad (2)$$

$\eta_o$  – ККД головної передачі,  $\eta_k$  – ККД колісної передачі.

При заблокованому гідротрансформаторі ККД ГМТ підвищується на 10-12%. ГМТ у порівнянні з ЕМТ має більш низький ресурс до капітального ремонту, що веде до зростання загальних витрат в період експлуатації, пов'язаний з організацією технічного обслуговування та ремонтом вузлів.

**Метою роботи** є проведення порівняльного аналізу особливостей трансмісій, що застосовуються на СКМ, а також пропозиція нового рішення для розробників трансмісій, яка дозволить покращити характеристики СКМ вітчизняного виробництва.

### Основна частина

ЕМТ є самостійним напрямком у розвитку трансмісій для колісних машин. Можливі кілька варіантів виконання схем ЕМТ: з генератором постійного струму та тяговими двигунами (ТД) постійного струму, з генератором змінного струму, випрямлячем та ТД постійного струму, з генератором змінного струму та ТД змінного струму.

Генератор постійного струму може бути виконаний досить компактно при використанні сверхмагнітів, однак, цьому варіанту виконання генератора властиві наступні недоліки:

- у своєму складі сверхмагніти мають рідкоземельні елементи (самарій, кобальт та ін.), точка Кюрі у яких може лежати в робочому діапазоні низьких температур, тобто можлива втрата магнітних властивостей і генератор не виконуватиме свої функції. Крім того, сверхмагніти виконуються на основі металокераміки та нестійкі до ударів і вібрацій, присутній також ефект «магнітного старіння» та зміни магнітних властивостей від 1% до 10% в рік. Тому при створенні ЕМТ перевага віддається генераторам змінного струму, які більш надійні в експлуатації та прості в обслуговуванні.

СУ ЕМТ повинна забезпечувати повне використання потужності дизеля в усьому інтервалі швидкостей руху машини при різних навантаженнях (рис. 2) [5]. З цією метою СУ дизеля та ЕМТ мають спільний регулятор (механічний або електронний). Найбільшому ККД відповідає область режимів роботи, обмежена кривою 1, криві 2, 3 та інші є лініями поступового зменшення ККД. Реалізація деякої часткової ефективної потужності  $P_e$  можлива при різних кутових швидкостях,

наприклад при  $n_1$  та  $n_2$  за рахунок відповідної зміни подачі палива. Внаслідок того, що точка  $A$  лежить на лінії більшого значення ККД, робота дизеля при кутовій швидкості  $n_2$  більш економічна.

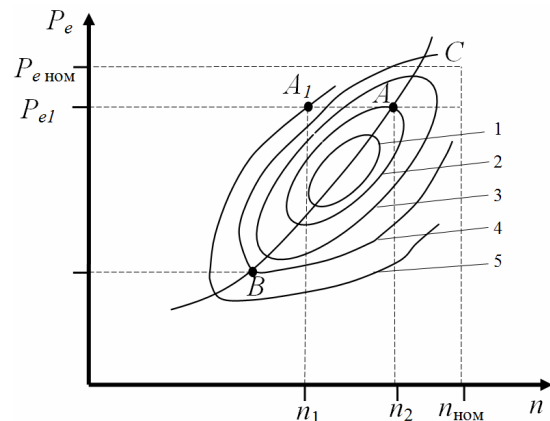


Рис. 2. Залежність потужності дизеля ( $P_e$ ) від кутової швидкості ( $n$ ) при постійних значеннях ККД

Точки  $A$ ,  $B$  та інші, в яких горизонтальні лінії є дотичними до ліній 1-5, відповідають режимам найбільшої економічності, тому що зміна кутової швидкості в обидві сторони від кожної точки призводить до зниження ККД. Тому лінія  $AB$ , яка з'єднує ці точки, є лінією найбільш економічних режимів роботи дизеля. Також ЕМТ повинна відповідати таким вимогам: забезпечувати максимальне тягове зусилля при русанні з місця та розгоні, забезпечувати максимальну швидкість машини.

Тягова характеристика машини для максимальної потужності дизеля показана на рис. 3 [4].

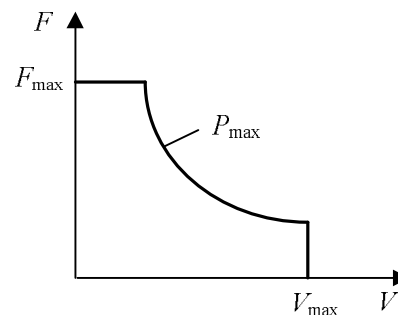


Рис. 3. Тягова характеристика колісної машини ( $F_{max}$ ,  $P_{max}$ ,  $V_{max}$  – максимальні значення тяги, потужності та швидкості відповідно)

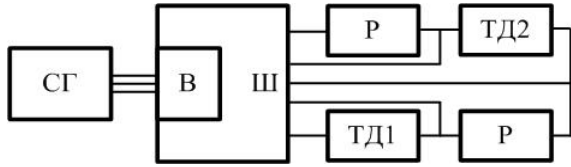
Основними перевагами ЕМТ у порівнянні з ГМТ є: плавність ходу і відсутність ривків машини при перемиканні передач, електричне гальмування з мінімальним зносом деталей, простота в обслуговуванні та можливість діагностування комплектуючих виробів в процесі експлуатації, екологічна чистота, не потрібні спеціальні сховища для відпрацювань [6, 7].

ЕМТ дозволяє забезпечувати роботу машини за схемою «електричного диференціала», в якій виконується примусова рівність струмів ( $I$ ) та моментів ( $M$ ) ТД, що покращує керованість машини в режимі поворотів, зменшує знос шин і підвищує ресурс ТД.

Для системи ЕМТ з двома обмотореними колесами з ТД постійного струму ця задача вирішується шляхом їх послідовного з'єднання (рис. 4) [4], де

$$M_1 \equiv M_2 \equiv \Phi \cdot I, \quad (3)$$

де  $\Phi \equiv I \cdot \omega$ ,  $\Phi$  – магнітний потік ТД,  $\omega$  – кількість витків обмотки збудження,  $I$  – струм ТД.

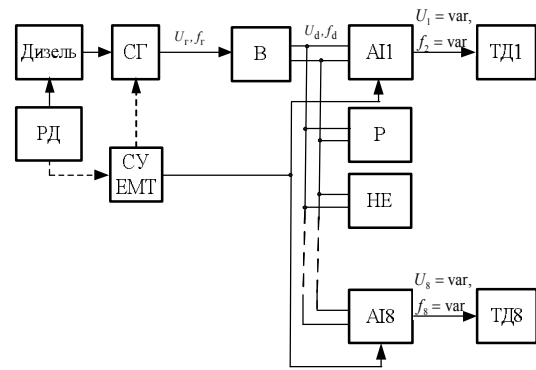


**Рис. 4.** Структурна схема ЕМТ постійного струму: СГ – синхронний генератор, В – випрямляч, Ш – шафа з електроапаратами та системою управління, Р – гальмові резистори, ТД – тягові двигуни постійного струму

Для машини з більшим числом обмоторених коліс ці питання повинні вирішуватися спеціальною СУ ЕМТ. ЕМТ на змінному струмі представляє можливість використання безколекторних ТД, вибір найкращого варіанту досить складне завдання. До числа найбільш відомих, що застосовуються, варіантів ТД можна віднести: асинхронний, синхронний, індукторний, вентильний. Кожен з них має свої переваги та недоліки [6]. Одними з перспективних є вентильні двигуни, які мають хороші тягові характеристики, високий ККД і прийнятні масо-габаритні показники. Система збудження виконується з використанням сильних магнітів, магнітопровід ротора і статора – з шихтованої електротехнічної сталі. Живлення ТД здійснюється від випрямленої напруги генератора через автономні інвертори струму, можливе застосування рідинного охолодження. Використання постійних магнітів підвищує показники ТД, проте знижує їх надійність в експлуатації.

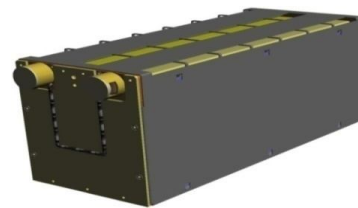
Індукторний (вентильно-індукторний ТД) має просту конструкцію, а значить і високу надійність [8]. В той же час створює проблеми із забезпеченням тягової характеристики в зоні малих швидкостей і реалізацією електричного гальма.

Синхронний двигун вирішує ці проблеми, але має в своєму складі ковзний контакт, який збільшує габарити й масу ТД. З урахуванням наявних напрацювань та досвідом експлуатації асинхронних ТД на рухомому складі [4, 7], можна зробити висновок про його найбільш реальну застосовність в ЕМТ спеціальної колісної машини. ЕМТ включає синхронний генератор, асинхронні ТД з короткозамкненим ротором, випрямляч, автономний інвертор напруги та мікропроцесорну систему управління. Схема забезпечує пуск двигуна від синхронного генератора ЕМТ: зі схеми виключається привід стартер-генератора, який складається з гідромуфти і фрикційної муфти, а також сам стартер-генератор. На рис. 5 показано: СГ – синхронний генератор, АП1-АІ8 – автономні інвертори напруги, ТД1-ТД8 – тягові асинхронні двигуни, НЕ – накопичувач енергії, СУ ЕМТ – мікропроцесорна система управління ЕМТ,  $U_r, f_r$  – напруга та частота напруги СГ,  $U_d, I_d$  – випрямлена напруга та струм,  $U_1 \dots U_8, f_1 \dots f_8$  – напруги та частоти живлення ТД.



**Рис. 5.** Електромеханічна трансмісія змінного струму

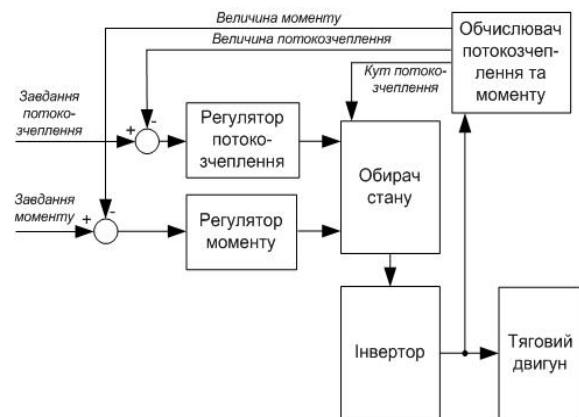
Електричні машини: генератор та ТД можуть бути виконані з рідинним охолодженням. ТД розміщується безпосередньо в колесі машини (мотор-колесо). Попереднє опрацювання ЕМТ для спеціальної машини з потужністю двигуна близько 600 к.с. показало, що маса ЕМТ буде менше на 250 кг в порівнянні з ГМТ, що дає можливість без збільшення ваги машини ввести в схему трансмісії накопичувач енергії (НЕ). НЕ може працювати як додаткове джерело та дозволить використовувати повторно енергію гальмування. Як приклад наведено дані електрохімічного конденсатора, зовнішній вигляд якого приведено на рис. 6: напруга  $U = 45$  В, ємність  $C = 400$  Ф,  $P_{max} = 48$  кВт, маса  $G = 40$  кг, температурний діапазон роботи  $-500^{\circ}\text{C} \dots +600^{\circ}\text{C}$ , термін служби – більше 15 років без обслуговування.



**Рис. 6.** Зовнішній вигляд конденсаторного модуля

ЕМТ спеціальної колісної машини повинна відповідати жорстким вимогам управління моментом як в статичних так і в динамічних режимах. У зв'язку з цим, найбільш прийнятним типом СУ є система прямого управління моментом по типу DTC [9, 10].

Структура системи прямого управління моментом ТД наведена на рис. 7.



**Рис. 7.** Структура системи прямого управління моментом

Цифрова реалізація системи управління ЕМТ колісної машини спеціального призначення потребує від обчислювача високої продуктивності. Більшість СУ приводами провідних західних фірм виконуються на процесорах цифрового оброблення сигналів (DigitalSignalProcessor, DSP). На ринку є спеціалізовані мікропроцесори DSP, наприклад ADMC300 фірми AnalogDevices, TMS320C(F)240 фірми TexasInstruments, 180196MC фірми Intel, MC68HC908MR24 фірми Motorola [11, 12].

Використання наведених мікропроцесорних засобів управління забезпечить реалізацію алгоритмів практично будь-якої складності у реальному масштабі часу, що дозволить реалізувати задані технічні характеристики машини. Очікуваний ККД ЕМТ, який виконано по схемі на рис. 5 – не нижче 0,8.

### Висновки

У роботі наведено аналіз різних типів трансмісій для спеціальних колісних машин. Основним типом трансмісій є гідромеханічна, яка представляє собою єдиний агрегат, який включає погоджувальну передачу, гідротрансформатор, коробку передач, гідродинамічне гальмо та вузли гідравлічної системи.

Гідромеханічна трансмісія забезпечує необхідні вимоги руху машини, має меншу металоемність, відсутність кольорових металів. У той же час, ГМТ має ряд недоліків, таких як низький ККД при включеному гідротрансформаторі та складності при її компонуванні в обсязі машини. Останнім часом намітилася тенденція переходу до ЕМТ. Вибір типу ЕМТ є багатофакторною задачею, рішення якої залежить від призначення машини, умов експлуатації, надійності, економічності та ряду інших чинників. Порівнювалися різні варіанти виконання ЕМТ. З урахуванням наявних напрацювань та досвідом експлуатації асинхронних ТД на рухомому складі, найбільш реальною видається ЕМТ змінного струму з тяговим синхронним генератором, випрямлячем, інвертором напруги, асинхронними ТД з короткозамкненим ротором та мікропроцесорною СУ прямого керування моментом. ТД можуть бути вбудовані в колесо; ЕМТ виконується з рідинним охолодженням, дозволяє здійснювати пуск дизеля від генератора (зі схеми виключається стартер з системою приводу). Зниження маси встановленого обладнання дає можливість застосування НЕ для можливого використання вторинної енергії гальмування. ККД ЕМТ складе не менше 0,8.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Многоцелевые гусеничные и колесные машины: Конструкция: Под ред. Г.И. Гладова. – М.: Транспорт, 2001. – 272 с.
2. Проектирование полноприводных колесных машин: В 2 т. Т. 1. Учебн. для вузов / [Б.А. Афанасьев, Н.Ф. Бочаров, Л.Ф. Жеглов и др.]; под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 488 с.
3. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / [Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Карпенко В.А. и др.]; под ред. А.Н. Туренко. – Харьков: ХГАДТУ(ХАДИ), 2001. – 642 с.
4. Мариев П.Л. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Кулешов, И.В. Зырянов. – СПб.: Наука, 2004. – 429 с.
5. Степанов А.Д. Передачи мощности тепловозов / А.Д. Степанов, В.А. Васильев, Б.Г. Кузнецов, А.Я. Лемберг, И.Ф. Семичастров. – М. – Машиностроение. – 1967. – 476 с.
6. Применение электромеханических трансмиссий для машин класса бронетранспортеров / А.В. Поторока, Е.И. Решетило, Г.П. Гращенков, В.В. Литовец. – Механіка та машинобудування. – 2012. – № 2. – С. 152 – 158.
7. Синчук О.Н. Теоретические аспекты построения структуры системы мониторинга состояния электрических приводов тяговых электротехнических комплексов / О.Н. Синчук, В.Ю. Захаров, Л.В. Сменова // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36, (1009). – С. 142-145.
8. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями: Автореферат диссертации / М.М. Лашкевич. – Москва, 2013. – 20 с.
9. Басов Г.Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу. Ч. 1. / Г.Г. Басов, С.І. Яцько. – Харків: Аспект+, 2005. – 248 с.
10. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. Х.: Основа, 2004 – 210 с.
11. Микропроцессорные системы автоматического управления гидродинамическими трансмиссиями легкобронированных колесных военных машин / С.В. Стривовский // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2012. – №4. – С. 80 – 87.
12. Перспективы применения гидромеханической трансмиссии с микропроцессорной системой управления на военных машинах / Е.Е. Александров, С.В. Стривовский // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С. 92 – 98.

Received (надійшла) 01.03.2020

Accepted for publication (прийнята до друку) 22.04.2020

### To the issue of electrical transmission selection and its control system for a special wheel machine

V. Noskov, V. Blyndiuk, M. Mezentsev, H. Heiko

**Abstract.** The subject of the article is the study of transmissions and control systems of special wheeled vehicles and a comparative analysis of them. The work showed that the main type of transmission, which is used in wheeled special vehicles, is a hydromechanical transmission, which has several advantages. But, at the same time, it has certain disadvantages. Recently, there has been a trend towards a transition to electromechanical transmission, which is superior to hydromechanical transmission in terms of efficiency, adjusting properties and layout flexibility. There is an opportunity in each wheel to have a traction motor (motor-wheel). Comparison of various versions of the electromechanical transmission completed. Taking into account the existing developments and experience in operating asynchronous traction motors on rolling stock, it is concluded that it is most practicable in transmissions of a wheeled vehicle. For a special purpose wheeled vehicle, the use of an electromechanical transmission with asynchronous traction motors, a microprocessor control system and an energy storage device is proposed.

**Keywords:** electromechanical transmission, transmission control system, energy storage.

О. Є. Федорович, Ю. Л. Прончаков

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

## МЕТОД ТА МОДЕЛІ ВИБОРУ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ПІДПРИЄМСТВА, ЩО РОЗВИВАЄТЬСЯ ДО НАЙБЛИЖЧОЇ ЦІЛІ РЕФОРМУВАННЯ

**Анотація.** Предметом дослідження в публікації є процес модернізації підприємства, що розвивається в умовах обмежених можливостей (витрат, строків, ризиків). Метою роботи є розробка методів та моделей, спрямованих на дослідження досягнення найближчих цілей реформування підприємства. В статті вирішуються наступні задачі: аналізуються цілі розвитку підприємства та робиться висновок відносно реалістичності досягнення найближчих цілей, які володіють мінімальним ризиком в умовах обмежених можливостей підприємства. Формується траєкторія руху до найближчої цілі, яка складається з кроків, пов'язаних з обмеженими можливостями підприємства. Кожний виконаний крок пов'язаний з вибором одного з можливих напрямів руху до найближчої цілі та оцінкою витрат, строків та ризиків для нового кроку. Ітеративний покроковий процес закінчується досягненням найближчої цілі. Запропоновані показники та фактори, пов'язані із досягненням найближчої цілі. Розглянуто дві постановки задачі для оптимізації витрат, строків та ризиків. Перша постановка задачі, пов'язана з якісним представленням значень показників та факторів. Запропоновано метод лексикографічного впорядкування «слів», які складаються з лінгвіністичних змінних. Шляхом впорядкування «слів», здійснюється вибір варіанту заходів реформування з оптимальними значеннями показників. Для другої постановки та рішення оптимізаційної задачі використано метод на основі кількісних оцінок з залученням булевих змінних. Проводиться оптимізація окремих (локальних) показників, а також компромісна оптимізація в умовах протиріччя показників. Запропоновано метод для оцінювання важливості показників у випадку суперечливих представлень експертами великої початкової невизначеності. В методі використовується величина розкиду оцінок показників для різних варіантів заходів, що проводяться відносно реформування підприємства. В роботі використані наступні методи: системний аналіз для представлення стратегій та траєкторій руху до найближчої цілі реформування; послідовні методи оптимізації, засновані на ітеративному процесі руху до цілі; метод якісного оцінювання варіантів за допомогою лінгвіністичних змінних та лексикографічного впорядкування варіантів; метод цілочисельної оптимізації та цілочисельного вибору варіантів реформування; метод оцінки важливості показників, заснований на величині розкиду значень показників для множини досліджуваних варіантів заходів, пов'язаних з реформуванням виробництва; метод багатокритеріальної оптимізації для пошуку компромісного рішення при виборі варіанту реформування підприємства. Були отримані наступні результати: обґрунтовано траєкторію руху до найближчої цілі реформування підприємства у вигляді ітеративного процесу досягнення цілі; представлені показники та фактори, які впливають на досяжність найближчої цілі реформування підприємства в умовах обмежених можливостей; запропоновано метод якісного оцінювання та оптимізації основних показників підприємства, що розвивається; представлено оптимізаційну модель для вибору найліпшого варіанту заходів, що проводились відносно реформування, заснованих на цілочисельній оптимізації за допомогою булевих змінних; запропоновано метод для вибору «ваги» (значимості) показників, заснований на величині розкиду оцінок показників на множині можливих заходів щодо реформування виробництва; запропонована оптимізаційна модель для вибору компромісного рішення з урахуванням отриманих значень «ваги» окремих показників

**Ключові слова:** траєкторія руху до найближчої цілі підприємства, що розвивається; вибір раціональних варіантів заходів, що проводились відносно реформування; якісні та кількісні оцінки показників та факторів в оптимізації; лексикографічне впорядкування варіантів; визначення значимості показників за допомогою величин розкиду оцінок показників; пошук компромісних рішень.

### Вступ

Глобалізація та турбулентність економічних процесів привела до необхідності планування процесів в умовах короткострокової перспективи [1, 2, 3]. Динаміка зміни вимог, велика невизначеність та непередбачуваність ринків збуту високотехнологічної продукції вимагають перегляду стратегії використання довгострокових прогнозів, які мають великі ризики невиконання та беззмстовні витрати [4, 5, 6]. Тому актуальна тема запропонованої публікації, в якій розглядається проблема формування та реалізації найближчих цілей реформування підприємства в умовах динамічних змін вимог ринку та обмежених можливостей підприємства.

### 1. Постановка завдання дослідження

Рух підприємства до наміченої найближчої цілі можна представити у вигляді деякої траєкторії у просторі основних факторів, які впливають на дося-

гнення цілі [7-9]. Наприклад, найближча ціль підприємства представляє покращення конкурентоспроможності [10-12]. Показниками та факторами, які впливають на досягнення цілі є якість (продукції та процесів виробництва), витрати на модернізацію, строки реформування, ризики досягнення цілі [13-15]. З-за обмежених можливостей підприємства рух до цілі за наміченої траєкторією буде здійснюватись покроково. При цьому на кожному  $e$ -му кроці, після його завершення, визначається ступень близькості до наміченої цілі, а також витрати, час виконання  $e$ -го кроку та ризики, які були подолані. Таким чином, досягнення найближчої цілі представляє собою ітеративний процес у вигляді послідовності кроків. На кожному  $e$ -му кроці проводяться заходи щодо поліпшення конкурентоспроможності, які приводять до зміни значень показників  $K$ ,  $Q$ , де  $K$  – рівень конкурентоспроможності продукції підприємства;  $Q$  – рівень якості та факторів  $W$ ,  $T$ ,  $R$ , де  $W$  – витрати на проведення заходів щодо реформування підприємства

тва;  $T$  – час, який було витрачено на модернізацію підприємства;  $R$  – ризики досягнення найближчої цілі. В незалежності від обмежених ресурсів підприємства на кожному  $e$ -му кроці можливі наступні стратегії досягнення найближчої цілі:

- мінімізація витрат,
- мінімізація часу витраченого на заходи щодо реформування підприємства;
- мінімізація ризиків;
- компромісна стратегія.

## 2. Рішення завдання дослідження

В залежності від ступеня невизначеності, пов'язаної з неповною інформацією та передбачуваністю поведінки зовнішнього середовища (конкурентоздатність ринків високотехнологічної продукції, що змінюється, економічна нестабільність та інш.) значення показників  $K$ ,  $Q$ , а також фактори  $W$ ,  $T$ ,  $R$  можуть бути надані в якісному або кількісному вигляді. Розглянемо якісні представлення значень показників та факторів. В цьому випадку можна скористатися лінгвістичними змінними  $X_j$ , значення яких задаються експертами. Наприклад, для фактора витрат  $W$ :

$$X_W = \begin{cases} A - \text{мінімальні затрати;} \\ B - \text{задовільні затрати;} \\ C - \text{великі затрати;} \\ D - \text{неприпустимі затрати;} \\ \text{(не відповідають можливостям підприємства).} \end{cases}$$

Тоді захід, що проводиться із множини можливих на  $e$ -му кроці досягнення цілі можна представити у вигляді деякого «слова»:

$$X_K, X_Q, X_W, X_T, X_R$$

де  $X_j$  має значення  $A, B, C, D$  для кожного представлення змінної  $X_j$ . Внутрішній зміст «слова» впорядковано в залежності від важливості показників (факторів). Розглянемо приклад пошуку найкращого, з точки зору витрат, заходу, який містить комплекс робіт, спрямованих на покращення конкурентоспроможності  $K$  та якості  $Q$  продукції, що випускається з урахуванням множини можливих варіантів заходів. В цьому випадку змінну  $X_j$  розташуємо в наступному порядку з урахуванням важливості показників (факторів)  $X_W, X_K, X_Q, X_T, X_R$ . Нехай, експерти надали множини можливих варіантів у вигляді набору неупорядкованих «слів» (значень показників (факторів)):

1.  $B B C B A$
2.  $A C B C B$
3.  $C A B A C$
4.  $A B C C B$
5.  $B B B B A$

Шляхом лексикографічного впорядкування «слів» можна відокремити варіант з мінімальними витратами та задовільними значеннями інших показників.

В результаті отримуємо:

4.  $A B C C B$
2.  $A C B C B$
5.  $B B B B A$
1.  $B B C B A$
3.  $C A B A C$

У прикладі, що розглядається, найкращим варіантом є четвертий, у якого мінімальні витрати (значення  $A$ ) та відносно добрі значення показників конкурентоспроможності. Якщо необхідно знайти компромісне рішення відносно всіх показників, то в цьому випадку експерти повинні надати бажане рішення у вигляді деякого контрольного «слова», наприклад,  $[B B B B B]$ . Це контрольне «слово» поміщається та впорядковується в існуючому списку «слів», наведених можливим варіантом заходів. Для нашого прикладу отримуємо:

4.  $A B C C B$
2.  $A C B C B$
5.  $B B B B A$
- $[B B B B B]$
1.  $B B C B A$
3.  $C A B A C$

Найближчим «словом» до контрольного  $[B B B B B]$  є 5-й варіант заходів  $B B B B A$ , який можна використовувати для досягнення найближчої цілі, пов'язаної з поліпшенням конкурентоспроможності підприємства. Якщо оцінки показників та факторів можна представити в кількісному вигляді, то скористаємося значенням булевих змінних  $X_e$ , де

$$X_e = \begin{cases} 1 - \text{якщо обрано } e\text{-захід} \\ \text{з множини можливих,} \\ 0 - \text{у іншому випадку.} \end{cases}$$

Тоді показники (фактори) можна представити у такому вигляді:

$$K = \sum_{e=1}^M K_e X_e; \quad Q = \sum_{e=1}^M Q_e X_e; \\ W = \sum_{e=1}^M W_e X_e; \quad T = \sum_{e=1}^M T_e X_e; \quad R = \sum_{e=1}^M R_e X_e,$$

де  $M$  – кількість можливих заходів щодо модернізації виробництва.

Для проведення оптимізації за окремим показником, наприклад, конкурентоспроможність  $K$ , необхідно скористатися одним із методів лінійного цілочисельного програмування (модернізований метод гілок та границь):

$$\max K; \quad K = \sum_{e=1}^M K_e X_e,$$

при виконанні обмежень:

$$Q \geq Q', \quad Q = \sum_{e=1}^M Q_e X_e; \quad W \leq W', \quad W = \sum_{e=1}^M W_e X_e;$$

$$T \leq T', T = \sum_{e=1}^M T_e X_e; \quad R \leq R', R = \sum_{e=1}^M R_e X_e,$$

де  $Q', W', T', R'$  – допустиме значення показників (факторів).

При цьому  $\sum_{e=1}^M X_e = 1$ , що означає обов'язковий

вибір конкретного заходу із множини можливих. Для пошуку компромісних рішень необхідно вказати важливість або «вагу» окремих показників (факторів), пов'язаних з досягненням найближчої цілі реформування. Дуже часто експерти не можуть або дають суперечливі оцінки важливості показників. Тому пропонуємо метод оцінки важливості показників (факторів), заснований на кількісних представленнях показників, оцінки, яких містяться у множині можливих варіантів заходів.

Якщо впорядкувати значення показників (факторів) за зростанням, то отримаємо мінімальні та максимальні значення показників (факторів) з усієї множини можливих заходів щодо реформування виробництва. Нас буде цікавити величина діапазону зміни значень показників (факторів). Чим більше діапазон у значеннях показників, тим більш дошкульніше показник (фактор). І навпаки, чим менш діапазон змін – тим менш дошкульніше показник (фактор) у множині варіантів. Найбільш дошкульні до змін значень показники (фактори) будуть відповідати найбільшій їх важливості. Тоді для розрахунку важливості (ваги) показників необхідно повести наступні дії:

1. Визначити відносну величину зміни значень за кожним показником (фактором) та пронормувати з урахуванням множини варіантів заходів:

$$\Delta F_i = (F \max_i - F \min_i) / \sum_{i=1}^M F_i,$$

де  $F \max_i$  – максимальне значення  $i$ -го показника (фактора),  $F \min_i$  – мінімальне значення  $i$ -го показника (фактора).

2. Провести розрахунок важливості (ваги) окремих показників (факторів):

$$\alpha_i = \Delta F_i / \sum_{i=1}^M \Delta F_i, \quad \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1,$$

де  $m$  – кількість показників (факторів).

Для пошуку компромісного рішення скористуємося мінімізацією комплексного показника у вигляді адитивної згортки.

Для нашого прикладу:

$$\min F; \quad F = \alpha_K \cdot \hat{K} + \alpha_Q \cdot \hat{Q} + \alpha_W \cdot \hat{W} + \alpha_T \cdot \hat{T} + \alpha_R \cdot \hat{R},$$

$$\text{де } \hat{K} = \frac{K^* - K}{K^* - K'}, \quad \hat{Q} = \frac{Q^* - Q}{Q^* - Q'}, \quad \hat{W} = \frac{W - W^*}{W' - W^*},$$

$$\hat{T} = \frac{T - T^*}{T' - T^*}, \quad \hat{R} = \frac{R - R^*}{R' - R^*},$$

де  $K', Q', W', T', R'$  – допустимі значення показників (факторів);  $K^*, Q^*, W^*, T^*, R^*$  – екстремальні значення показників (факторів).

$$K = \sum_{e=1}^M K_e X_e, \quad Q = \sum_{e=1}^M Q_e X_e, \quad W = \sum_{e=1}^M W_e X_e,$$

$$T = \sum_{e=1}^M T_e X_e, \quad R = \sum_{e=1}^M R_e X_e, \quad \sum_{e=1}^M X_e = 1.$$

## Висновки

В роботі отримані наступні результати. В теоретичному плані розроблено методологічний підхід, спрямований на оцінку можливостей реформування підприємства для реалізації найближчої цілі. Процес руху до найближчої цілі наведено у вигляді траєкторії з покроковим переходом від поточного стану до наступного. Кожний раз, при цьому, коректується напрям руху до найближчої цілі реформування підприємства та оцінюються витрати часу виконання заходів та ризику. В залежності від невизначеності кожного кроку, оцінки показників та витрат представлені якісно та кількісно. Розроблено метод для якісного оцінювання варіантів заходів, заснований на лінгвістичних змінних. При використанні кількісних оцінок за допомогою булевих змінних, представлені основні показники та фактори, пов'язані з оптимізацією проведення заходів щодо реформування підприємства. Розроблено метод оцінки важливості показників, заснований на величині діапазону кількісних оцінок варіантів заходів, що проводилися.

Запропонований підхід доцільно використовувати на початковому етапі реформування підприємства, коли формується найближча ціль модернізації виробництва, визначаються показники та фактори для досягнення найближчої вибраної цілі. В подальшому, при покроковій стратегії руху до найближчої цілі, необхідно враховувати обмеження можливості підприємства на кожній ітерації реформування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клыкков, Ю. Н. Ситуационное управление большими системами [Текст] / Ю. Н. Клыкков. – М. : Энергия, 1974. – 136 р.
2. Lindgren, M. Scenario Planning The link between future and strategy [Text] / M. Lindgren, N. Bandhold. – Palgrave Macmillan UK, 2002. – 180 p. DOI: 10.1057/9780230511620.
3. Мелёхин, В. Б. Теоретические аспекты эффективного управления поведением социально-экономических объектов в нестабильной окружающей среде [Электронный ресурс] / В. Б. Мелёхин, Н. Ш. Шихалиева // Интернет журнал «Науковедение». – 2014. – Вып. 4 (23), – Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/116EVN414.pdf>. – 11.02.2020.
4. Ямпольский, С. М. Ситуационный подход к управлению организационно-техническими системами при планировании операции [Текст] / С. М. Ямпольский, А. Н. Костенко // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – Том. 8. – №. 2. – С. 62–69.

5. Uskenbayeva, R. K. Situational Management for Process Implementation of Working Operations of the Business Process [Text] / R. K. Uskenbayeva, B. K. Kurmangaliyeva, D. Yedilkhan // 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) . – Hangzhou; China, 2015. – P. 292–297. DOI: 10.1109/SICE.2015.7285573.
6. Системы поддержки принятия решений в управлении проектами, основанные на качественных методах [Текст] / О. Н. Гуца, Д. Б. Ельчанинов, А. П. Порван, С. В. Якубовская // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Стратегическое управление, управление портфелями, программами и проектами. – X. : НТУ "ХПИ", 2017. – № 3 (1225). – С. 82-88. DOI: 10.20998/2413-3000.2017.1225.14.
7. Кравец, Р. О. Динамічна координація стратегій мультиагентних систем [Текст] / Р. О. Кравец // Бюлетень Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – No. 699. – P. 134–144.
8. Федорович, О. Е. Использование компонентно-компетентностного подхода для формирования кооперации исполнителей инновационного заказа при создании сложной аэрокосмической техники [Текст] / О. Е. Федорович, О. А. Гайденко, В. А. Пуйденко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 2 (146). – С. 54-58. DOI: 10.32620/akt.2018.2.07.
9. Федорович, О. Е. Логистика выполнения портфеля заказов высокотехнологической продукции развивающегося виртуального предприятия [Текст] / О. Е. Федорович, Ю. Л. Прончаков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 3 (130). – С. 99-102.
10. Roszak, M. T. Zarządzanie jakością w praktyce inżynierskiej [Text] / M. T. Roszak // Open Access Library. – 2014. – Vol. 1 (31). – 150 p.
11. Pawluczuk, Ju. К проблеме управления производственными ресурсами предприятия [Текст] / Ju. Pawluczuk // Zarządzanie : Teoria i praktyka. – 2011. – № 1(3). – С. 17-26.
12. Федорович, О. Е. Методы и модели исследования виртуальных производств, ориентированных на выпуск высокотехнологической продукции [Текст] / О. Е. Федорович, К. О. Западня, О. А. Гайденко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 1 (136). – С. 54–59.
13. Гюльмамедов, Р. Г. Метод построения стратегии в системах ситуационного управления [Текст] / Р. Г. Гюльмамедов // Информационно-управляющие системы. – 2011. – No. 6. – P. 36–39.
14. Paulsen, S. Summary of the Workshop on information and communication technologies supply chain risk management [Text] / S. Paulsen, J. Voens. – National Institute of Standards and Technology, 2012. – 21 p.
15. Белл, Е. А. Віртуальні підприємства як елемент підвищення інноваційної активності та привабливості малого та середнього бізнесу [Текст] / Е. А. Белл // Вісник Хмельницького національного університету: Економічні науки. – 2009. – No. 1. – P. 162–166.

Received (надійшла) 30.03.2020

Accepted for publication (прийнята до друку) 08.05.2020

### Method and models to select the trajectory of developing enterprise moving to the immediate reform goal

O. Fedorovich, Yu. Pronchakov

**Abstract.** The subject of research in the publication is the process of modernization of a developing enterprise in terms of limited opportunities (costs, timing, risks). The aim of the work is to develop methods and models aimed at researching the achievement of the immediate goals of enterprise reform. The following tasks are solved in the article: the development goals of the enterprise are analyzed and a conclusion regarding the feasibility of achieving immediate goals that have minimal risk in the face of limited enterprise capabilities is made. A trajectory of movement to the immediate goal which consists of steps related to the limited capabilities of the enterprise is formed. Each step taken is associated with the selection of one of the possible directions of movement towards the immediate goal and the assessment of costs, timelines and risks for the new step. An iterative step-by-step process ends if the immediate goal is achieved. The indicators and factors associated with the achievement of the immediate goal are proposed. Two problem statements for optimizing costs, timelines and risks are considered. The first statement of the problem is related to the qualitative presentation of the values of indicators and factors. The method of lexicographic ordering of "words", which consist of linguistic variables is proposed. By streamlining the "words", a choice of the option of reform measures with optimal values of indicators is made. For the second statement and solution of the optimization problem, the method based on quantitative estimates involving Boolean variables is used. Optimization of individual (local) indicators as well as compromise optimization in the conditions of inconsistency of indicators are carried out. The method for assessing the importance of indicators in case of conflicting representations of large initial uncertainty by experts is proposed. The method uses the scatter of the estimates of indicators for various options for activities undertaken in relation to the reform of the enterprise. The following methods have been used in the work: system analysis to represent strategies and trajectories of movement toward the immediate goal of reform; sequential optimization methods based on an iterative process of moving toward a goal; a method for the qualitative assessment of options using linguistic variables and lexicographic ordering of options; the method of integer optimization and integer choice of reform options; a method for assessing the importance of indicators, based on the magnitude of the dispersion of indicator values for the set of investigated options for activities related to the reform of production; multicriteria optimization method to find a compromise solution when choosing an enterprise reform option. The following results have been obtained: a reasonable trajectory of movement towards the immediate goal of enterprise reform in the form of iterative process of goal achievement; indicators and factors affecting the attainability of the immediate goal of enterprise reform in terms of limited opportunities are presented; the method of qualitative assessment and optimization of the main indicators of a developing enterprise is proposed; optimization models are presented for choosing the best option for the measures taken in relation to reform based on integer optimization using Boolean variables; the method to select the "weight" (significance) of indicators, based on the magnitude of the dispersion of estimates of indicators on the set of possible measures for reforming production is proposed; the optimization model to select a compromise solution taking into account the obtained "weight" values of individual indicators is proposed.

**Keywords:** trajectory of movement towards the immediate goal of a developing enterprise; selection of rational options for measures taken in relation to reform; qualitative and quantitative estimates of indicators and factors in optimization; lexicographical ordering of options; determination of the significance of indicators using the scatter values of indicator estimates; search for compromise solutions.



Є. В. Любий, Д. О. Ларін

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,

## ПІДХІД ЩОДО ФОРМУВАННЯ МЕРЕЖІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ У НАПРЯМКУ ХАРКІВ-БЕРДЯНСЬК

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є мережа електричних зарядних станцій у напрямку Харків - Бердянськ. Метою дослідження є розробка підходу по визначенню місць розташування швидких електричних зарядних станцій. Завдання дослідження: проаналізувати сучасний український парк електромобілів і існуючу мережу зарядних станцій; проаналізувати існуючі підходи щодо формування ефективних мереж електричних зарядних станцій; розробити підхід щодо формування мережі зарядних станцій при русі в міжміському сполученні, який буде враховувати можливості переважної більшості парку електромобілів в Україні; розробити практичні рекомендації щодо вибору місць розташування швидких електричних зарядних станцій при русі в напрямку Харків – Бердянськ. Отримані наступні результати: розроблено підхід до вибору місць розташування швидких електричних зарядних станцій в напрямку Харків - Бердянськ, який заснований на визначенні граничної відстані, що долається електромобілем на одному повному заряді акумулятора; запропоновані місця для розміщення швидких зарядних станцій. **Висновки.** Запропонований підхід щодо визначення місць розташування швидких електричних зарядних станцій враховує можливості переважної більшості сучасного парку електромобілів України. Основою для визначення місць розташування швидких зарядних станцій є гранична відстань, яку може подолати електромобіль на одному повному заряді акумулятора. З використанням підходу встановлено необхідну кількість швидких зарядних станцій, яка для напрямлення Харків - Бердянськ складає 8 од. Методика визначення кількості автомобільних заправних станцій, представлена в ДБН В.1.1-7, може бути адаптована для розрахунку потрібної кількості швидких електричних зарядних станцій для певної території.

**Ключові слова:** електромобіль, мережа зарядних станцій, відстань поїздки, закон розподілу, міжміське сполучення.

### Вступ

Електромобіль – транспортний засіб, що приводиться в рух одним або декількома електродвигунами з живленням від автономного джерела електроенергії (акумуляторів, паливних елементів, конденсаторів тощо), а не двигуном внутрішнього згорання.

Електромобіль одне з найкращих рішень на шляху до більш безпечного для навколишнього середовища пересування. Перші розробки електромобілів з'явилися ще у XIX столітті та зараз вони все частіше зустрічаються на дорогах нашої країни.

Люди все частіше замінюють автомобілі з бензиновими та дизельними двигунами на електромобілі. Всього п'ять років тому на українських теренах можна було зустріти близько 1000 електромобілів і гібридів, а вже сьогодні їх понад 20 тисяч. Одночасно з ростом «електромобілізації» почала й швидко розвивається відповідна інфраструктура.

Сучасна мережа зарядних станцій нараховує понад тисячу пунктів на карті України.

Українці охоче пересаджуються на автомобілі без двигуна внутрішнього згорання і це зумовлено багатьма причинами, основними з яких є:

- економічність – ціна на традиційне паливо систематично зростає, а вартість електроенергії, витрачена на підзарядку автомобіля, є значно нижчою;

- дешевше обслуговування;

- відсутність податку при купівлі або ввозі в країну;

- екологічність – працюючий двигун не виділяє ніяких газів, тому не забруднює навколишнє середовище;

- безшумність – двигуни цих авто практично безшумні.

Звичайно поряд з перевагами є багато недоліків: значна вартість електромобіля; малий запас ходу; недостатня кількість станцій для зарядки електромобілів (особливо в приміському та міжміському сполученнях). Слід розуміти, що основна концентрація зарядних станцій для електромобілів приходить на території великих і значних міст, причиною чого, в першу чергу, є відповідний попит на них. В даний час складно собі уявити електромобілі на міжміських автомагістралях, основними причинами чого є відносно малий запас ходу таких транспортних засобів (виключенням є електромобілі Tesla), а також відсутність мережі швидкісних зарядних станцій.

### Характеристика парку електромобілів в Україні

Якщо звернутися до офіційної статистики Укравтопрому, за вісім місяців з початку 2019 року в Україні було поставлено на облік 4791 електромобіль, що в півтора рази більше, ніж за аналогічний період минулого року.

Основну масу в цій кількості склали легкові автомобілі – 4441 од., інші 350 од. – комерційні авто. При цьому, якщо реєстрації легкових автомобілів на електротязі в порівнянні з минулим роком збільшилися на 47 відсотків, то попит на комерційні електромобілі підскочив в 2,1 рази [1].



Вибираючи електромобіль, українці продовжують віддавати перевагу старим автівкам. В результаті чого, за період з січня по серпень 2019 року частка імпортованих авто на первинному ринку легкових електромобілів склала 91 %, а в комерційному сегменті – 95 %.

Найпопулярнішим легковим електромобілем в Україні продовжує залишатися NISSAN Leaf. За перші вісім місяців 2019 року 2207 автомобілів цієї моделі поповнили автопарк країни.

За підсумками цього періоду найбільш популярними моделями в Україні є [1]: Nissan Leaf – 2207 од.; Tesla Model S – 384 од.; BMW i3 – 243 од.; Fiat 500e – 207 од.; Volkswagen E-Golf – 198 од.; Renault Zoe – 186 од.; Mercedes-Benz B-Class Electric Drive – 155 од.; Tesla Model X – 136 од.; Chevrolet Bolt – 126 од.; Jaguar I-Pace – 102 од.

У комерційному сегменті майже всю статистику сформував RENAULT Kangoo ZE – 323 реєстрації з початку року.

Також важливою перевагою електроавтомобілів є звільнення власників таких транспортних засобів від сплати деяких митних платежів. Так, при ввезенні на митну територію України транспортних засобів, оснащених виключно електричними двигунами (одним чи кількома), що зазначені у товарній підкатегорії 8703901010 згідно з українського класифікатору товарів зовнішньоекономічної діяльності, з метою вільного обігу сплачується лише акцизний податок за ставкою, встановленою абзацом 10 пп. 215.3.51 ст. 215 ПКУ. Ставка акцизного податку встановлюється у розмірі 1 євро за 1 кіловат-годину ємності електричного акумулятора таких транспортних засобів.

За місткістю та комфортом електроавтомобілі не відрізняються від авто з двигунами внутрішнього згоряння, а ось на технічному обслуговуванні (ТО) можна істотно заощадити: в 2019 році річне ТО із заміною вугільних фільтрів складе (1200-1500) грн. Для порівняння, при ТО для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння буде коштувати мінімум (2400-3000) грн. Якщо говорити про обслуговування, то прості деталі в електромобілі може замінити і звичайний автослюсар, але перевірку акумулятора краще проводити на спеціалізованих станціях технічного обслуговування, яких в нашій країні с кожним роком стає все більше.

Незважаючи на всі переваги електроавтомобілів, у них існує дві найважливіші проблеми, які заважають буквально заповнити авторынок України. Перша – це місткість акумулятора, оскільки переважна більшість електроавтомобілів були у використанні. Запасу ходу для таких електромобілів в теплу пору року вистачає на 100-120 км. Взимку ця цифра зменшується, що унеможливує поїздки навіть на середні відстані.

Новий електромобіль має 8 років гарантії від виробника, тобто через 8 років зменшується пробіг на одному заряді. Щоб батарея максимально довго служила, потрібно її правильно заряджати повільним струмом 6-8 годин.

У випадку із авто з пробігом, у акумулятора можна визначити проблемні частини батареї та за-

мінити їх. Вартість заміни таких деталей та їх регулювання буде коштувати з роботою близько 500 доларів США. Якщо необхідна повна заміна батареї, вартість нової становить приблизно 3500 доларів США.

Другий істотний недолік електроавтомобілів – низька швидкість заправки. Так, якщо на заправку звичайним паливом йде від 5 хвилин до 15 хвилин, то на електричну зарядку в самому «швидкісному» режимі доведеться витратити близько години (мінімум 30 хвилин – 50 хвилин), а правильна, рекомендована виробниками зарядка займе від 4 годин до 8 годин.

Незважаючи на такі досить значні недоліки в експлуатації електроавтомобілів, число їх прихильників в нашій країні росте з кожним днем. Пов'язано це, перш за все з тим, що повністю зарядити батарею (24 кВт) обійдеться в (70-100) гривень, в той час як 40-літровий бак аналогічного авто з двигуном внутрішнього згоряння обійдеться близько (1000-1200) гривень. Газовий аналог близько (400-450) гривень, але це значно дорожче в порівнянні з вартістю електричного заряду.

Якщо говорити про ціну на самі авто, найпопулярніший в Україні Nissan Leaf з пробігом обійдеться в 12-15 тисяч євро. Нова модель з салону буде коштувати 26 тисяч євро. Інші електрокари коштують значно дорожче, наприклад Tesla Model S, яку все частіше можна зустріти на українських дорогах, з пробігом буде коштувати від 45 тисяч євро, а нова – від 100 тисяч євро.

### Сучасна мережа зарядних станцій

Мережа електричних зарядних станцій (ЕЗС) для електромобілів в Україні зростає з кожним роком. Електрозаправки все частіше можна побачити на вулицях міст та на звичайних АЗС в областях.

Сьогодні за інформацією PlugShare [2], на території нашої країни працює понад 1000 електрозарядних станцій, причому розташовуються вони, в основному, не так на класичних АЗС, а біля кафе та ресторанів, динаміка росту кількості станцій відображена на рис. 1. Але варто відзначити, що спостерігається дефіцит швидкісних зарядних станцій для електромобілів.

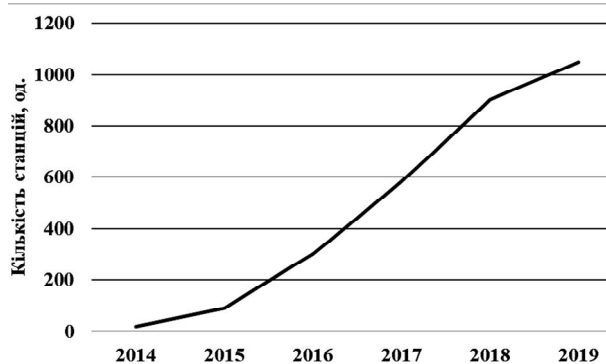


Рис. 1. Динаміка росту кількості зарядних станцій

Зараз в Україні на 11 тисяч електромобілів припадає близько тисячі зарядних станцій. Але бі-

льшість з них повільні, зарядка на них вимірюється годинами. Крім того, зарядні станції розподілені нерівномірно та, в більшій мірі, у великих містах, наприклад в Полтаві нараховується 22 ЕЗС, в той час як у Харкові кількість таких станцій в 4-5 разів більша. Швидкісних зарядок потужністю 50 кВт і більше поки всього кілька десятків. Наприклад, 10 швидкісних зарядних станцій потужністю 50 кВт використовуються в мережі STRUM, на будівництво яких компанія ДТЕК інвестувала 15,5 млн. гривень. Швидкісні станції дозволяють зарядити батарею автомобіля за 15 хвилин на 70 км пробігу.

Мала кількість зарядних станцій в областях ускладнює поїздки в міжміському сполученні, а для деяких типів електрокарів з невеликою місткістю заряду акумулятора поїздки на дальні відстані є практично нездійсненним.

Детальну інформацію про розташування ЕЗС в Україні для кожного з міст можна отримати на спеціалізованих сайтах PlugShare або NEVCars за посиланнями [2] та [3], відповідно. На карті відзначено місцезнаходження кожної станції за двома видами: громадські станції; станції високої потужності (з можливістю швидкої зарядки CHAdeMO).

Також існують сервіси для смартфонів для зручного обрання найближчої станції зарядки для різних типів і марок електроавтомобілів. Наприклад, безкоштовний сервіс AE Charging Point від компанії AutoEnterprise, який дозволяє швидко підібрати найближчу, вільну ЕЗС в режимі онлайн та сплатити послугу зарядки авто.

### Аналіз публікацій

Приступаючи до аналізу існуючих підходів щодо визначення місць розташування ЕЗС слід розуміти, що даний сегмент українського транспортного ринку знаходиться в стані стихійного розвитку. Звідси можна виділити як переваги – мається велика конкуренція, так і недоліки – відсутнє відповідне державне регулювання питань визначення та облаштування місць для організації зарядки електроавтомобілів. Відсутність нормативної документації з питань організації та визначення місць розташування ЕЗС створює додаткове підґрунтя для розробки підходів щодо визначення місць розташування ЕЗС для планування поїздок у міжміському сполученні.

Результати аналізу іноземних джерел, які присвячені обранню для дослідження питання свідчать, що оптимальний метод для планування місць розташування зарядної станції полягає, в основному, відштовхуючись від поведінки водія. З точки зору водія електроавтомобіля, важливо, щоб вартість і час поїздки до місця призначення були мінімальними. З іншого боку, з точки зору власника ЕЗС, слід контролювати, щоб не було зменшення попиту для кожної точки зарядки [4].

Звідси можна виділити дві мети для методів оптимального місця розташування ЕЗС:

- вартість за одну поїздку (від початку до пункту призначення, в яку включена сумарна вартість всіх зарядок авто) та час очікування зарядки акумулятора на зарядній станції слід мінімізувати;

- час простою без роботи кожної ЕЗС повинний бути мінімальним.

Досягнення першої мети залежить від складності маршруту руху та можливого часу очікування зарядки акумулятора. Чим більше час зарядки акумулятора – тим більш не задовільним є маршрут для водія. Таким чином можна сказати, що мінімізація часу очікування зарядки є основним фактором рішення.

У другій меті вказується можливість зменшення користувачів ЕЗС. Наприклад, якщо багато зарядних станцій розташовані в одному районі, електрична потреба кожної зарядної станції може бути низькою. Однак зарядні станції в інших районах можуть не впоратися з високим попитом і як результат з'являються черги. З цієї точки зору слід розглянути розташування зарядних станцій, щоб забезпечити однакові можливості зарядки для користувачів електрокарів, а також вирівняти електричну потребу в зарядці електрокарів.

Слід також розуміти, що розташування станцій зарядки впливають на поведінку водія при виборі маршруту. Електроавтомобіль споживає електроенергію, що зберігається в акумуляторі, пропорційно темпу їзди в дорозі. Користувачі електрокарів можуть заряджати акумулятор у себе вдома від звичайної електромережі або на будь-яких зарядних станціях, у своїх офісах, торгових центрах тощо. Автомобілю потрібна зарядка до того, як стан заряду досягне нуля. Рівень заряду може розглядатися як паливний датчик в звичайних автомобілях. Якщо на маршруті потрібна зарядка, але на шляху до пункту призначення немає пунктів ЕЗС, то маршрут може бути змінений для заїзду до найближчої точки зарядки, ця ситуація відображена на рис. 2 [4].

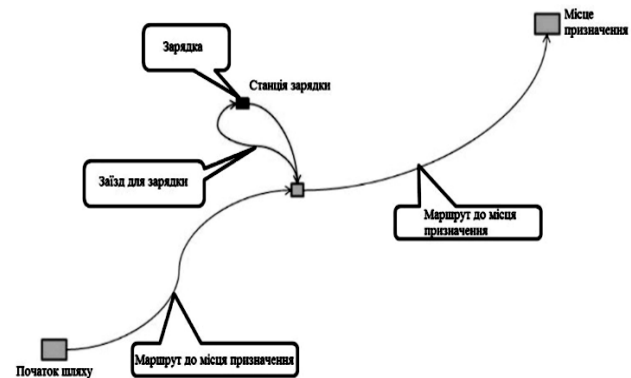


Рис. 2. Вплив місця розташування станції зарядки на поведінку водія

За статистикою зарядка проводиться водіями коли рівень заряду акумулятора знижується до 10-20% [5]. Отже водій повинен спланувати поїздку таким чином, щоб при досягненні такого рівня заряду на маршруті була поруч станція зарядки. При виборі найкомфортнішого напрямку перед водієм постає багато питань.

Наприклад, як зображено на рис. 3, на найкоротшому варіанті шляху немає зарядних станцій і тому при його виборі водій ризикує розрядити акумулятор перш ніж дістанеться до кінця напрямку [4].

При виборі шляху із швидкою зарядкою водій зменшує до мінімуму час очікування при зарядці, але таким чином довжина шляху набагато більша ніж в першому варіанті та вартість зарядки дорожча.

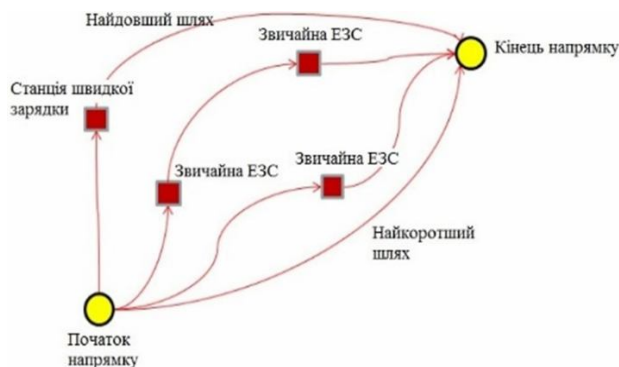


Рис. 3. Вибір найкомфортнішого маршруту водієм

При виборі інших шляхів зі звичайними ЕЗС водію доведеться набагато довше очікувати зарядку акумулятора, але при такому варіанті відстань до пункту призначення менша та вартість зарядки менша ніж в іншому варіанті.

До того ж необхідно враховувати можливість черг, які подовжать час очікування, а також від станції та тип роз'єму, яким відбувається зарядка. Розробити точну методику для вибору маршруту поки що неможливо, тому як кожний водій індивідуально визначає для себе пріоритетні умови на дорозі. Але для більшості при виборі оптимального маршруту головною умовою залишається мінімальний час на подолання шляху, а також мінімальна вартість та час очікування зарядки [4].

На сьогоднішній день існують дослідження, які стосуються планування місць розміщення ЕЗС зосереджені лише на мінімізації вартості зарядки [6]. Але ринок електроавтомобілів збільшується з кожним роком і інфраструктура стає більш вдосконаленою враховуючи більшу кількість критеріїв розташування.

Такі методи планування точок для зарядки відштовхуються від доступності до громадського транспорту і розташовуються в таких місцях як вокзал, кафе, ресторан, автостоянка або торговий центр. Але рідко йде мова про оптимізацію розташування з точки зору блоку живлення. Частою проблемою є не відповідність джерела струму і зарядки авто. Потрібно знати чи є стабільним джерело живлення, адже деякі зарядні станції не в змозі виконувати зарядку за всіма вимогами автомобіля. Звідси можуть з'явитися такі проблеми як швидкий знос акумулятора авто, несправність кабелів зарядки, а в деяких випадках пошкодження електричної проводки, яка живить пункт зарядки.

Також слід розуміти, що оптимальна кількість і ефективність діяльності зарядних станцій в межах міста можуть бути визначені лише на основі сучасних наукових методів оптимального проектування виробничих процесів на принципах ресурсозбереження та високої продуктивності. Зарядні станції є типовими системами масового обслуговування ос-

новне завдання при цьому полягає у встановленні ефективного співвідношення між кількістю заявок на обслуговування за одиницю часу і продуктивністю та пропускну спроможністю відповідної зарядної станції.

Складність при цьому полягає в тому, що через випадковий характер надходження заявок за часом, можливе як утворення черги цих заявок з відповідним очікуванням, так і простій обладнання зарядної станції через відсутність заявок.

Застосовуючи методику [7] можна визначити оптимальну кількість зарядних станцій на окремій території, необхідних для заданої кількості електромобілів, виходячи з мінімізації простоїв і черг.

Розрахунки проводяться на основі мінімізації простоїв як обслуговуючих пристроїв, так і авто, які обслуговуються, але в сучасних реаліях даний підхід не може бути реалізований тому, що зарядні станції електромобілів належать різним власникам з різними пріоритетами. Так власники зарядних станцій прагнуть залучити якомога більше відвідувачів і основною метою є відсутність простоїв в роботі станцій. В свою чергу, власники електромобілів очікують на відсутність черги і безперешкодну зарядку.

### Мета і постановка задачі

Результати аналізу практичних і наукових літературних джерел свідчать про відсутність підходів щодо визначення місць розташування ЕЗС при плануванні та організації поїздок у міжміському сполученні. Існуючі підходи, в переважній кількості, розроблені для міст та їхніх околиць. Отже, метою даного дослідження є розробка підходу щодо визначення місць розташування ЕЗС в напрямку Харків – Бердянськ.

Основою для розробки підходу щодо визначення місць розташування ЕЗС при пересуванні електроавтомобілем у міжміському сполученні повинна бути об'єктивна інформація про середній денний пробіг електромобіля та наявну електромобільну інфраструктуру.

### Аналіз сучасної мережі зарядних станцій для електромобілів у напрямку Харків – Бердянськ

В Україні на сьогодні є багато популярних напрямків, за статистикою центру транспортних стратегій 2019 року найпопулярнішим маршрутом, яким користувалися українці став Київ – Чернігів. Поїздки до Одеси посідають друге місце, також достатньо популярними є напрямки: Київ – Одеса, Київ – Черкаси, Миколаїв – Одеса, Івано-Франківськ – Львів тощо [9].

Особливо великим попитом користуються напрямки до курортних міст України у літню пору року, найактивнішим літнім місяцем для подорожей виявився серпень.

Частіше за все влітку 2019 року українці їздили в курортні міста та селища країни, серед яких були Бердянськ (Запорізька область), Кирилівка (Запорізька область), Залізний порт (Херсонська область), Затока (Одеська область), Південне (Одеська об-

ласть). У харківській області популярним є напрямок Харків – Бердянськ. При цьому найкоротшим є шлях: Харків – Красноград – Новомосковськ – Запоріжжя – Василівка – Токмак – Бердянськ, протяжністю – 485 кілометрів.

Слід розуміти, що на даному напрямку вже існує мережа зарядних станцій для електромобілів (рис. 4).

Варто також відзначити, що у різних пунктах позначених на маршруті знаходиться різна кількість точок зарядки для електрокарів.

Багато з них відрізняється за типом станції, видом роз'єму або режимом зарядки і можуть не підходити для тієї чи іншої марки авто.

Детальніша характеристика по кожній ЕЗС представлена в табл. 1.

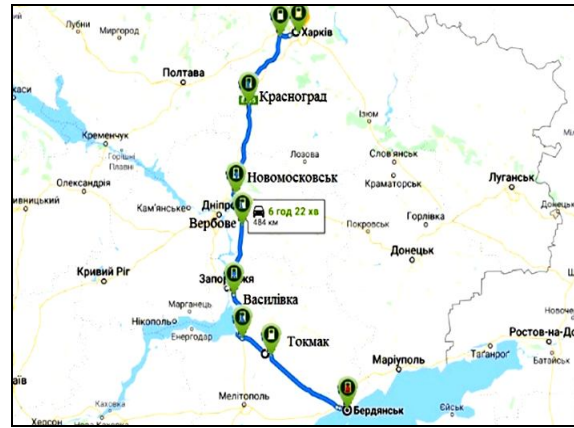


Рис. 4. Мережа зарядних станцій на напрямку Харків – Бердянськ

Таблиця 1 – Характеристика зарядних станцій

Місто, область	Адреса, місце розташування	Тип роз'єму конектора для зарядки	Можливість швидкої зарядки
Харків	вул. Чувашська, 1	3 EV Plug (J1772)s, CHAdeMO DCFC	так
Харківська обл.	с. Песочин, вул. Пушкіна, 4	3 EV Plug (J1772)s	ні
	смт. Коротич, автодорога Київ – Харків -Довжанський, 464 км	EV Plug (J1772), Mennekes (Type 2)	ні
	Автодорога Київ -Харків - Довжанський, 463 км	EV Plug (J1772), Mennekes (Type 2)	ні
Красноград	с. Улянівка	CHAdeMO DCFC	так
	вул. Харківська, 125	EV Plug (J1772)	ні
Ново-московськ	вул. Гетьманська, 234 Б	2 EV Plug (J1772)s	ні
Вербо́ве	вул. Шевченка, 18	3 EV Plug (J1772)s	ні
Запоріжжя	вул. Ігоря Сікорського	EV Plug (J1772), Mennekes	ні
	Донецьке шоссе, 7	EV Plug (J1772), Mennekes	ні
	вул. Магістральна, 100	EV Plug (J1772)	ні
	Горіховське шоссе, 7А	EV Plug (J1772), Mennekes	ні
Василівка	б-р Центральний, 14/9	Ports 3 EV Plug (J1772)s	ні
	Траса Е 105	EV Plug (J1772), Mennekes (Type 2)	ні
	автодорога Харків - Сімферополь, 343 км	CHAdeMO DCFC	так
Токмак	вул. Гоголя, 140	EV Plug (J1772), Mennekes (Type 2)	ні
Бердянськ	Мелітопольське шосе, 108 Б	EV Plug (J1772), Mennekes (Type 2)	ні

На даному напрямку можна виділити дві основні проблеми, що пов'язані з мережею ЕЗС. Перша – це великі відстані між ЕЗС, які в деяких випадках сягають 90 км. Найбільші відстані між ЕЗС:

Красноград – Новомосковськ – 84 км,  
Токмак – Бердянськ – 99 км.

Другою проблемою є швидкість зарядки на існуючих ЕЗС.

Більшість станцій на напрямку здійснюють зарядку з використанням однофазної мережі змінного струму з максимальною напругою 230 В, силою струму 32 А і граничною потужністю 7 кВт.

На напрямку, що розглядається, також є ЕЗС з можливістю використання режиму швидкої зарядки CHAdeMO, розрахованого на максимальне напруження 500 В і силу струму 125 А з потужністю до 62,5 кВт. Зазвичай на таких станціях електрокар з батареєю 24 кВт заряджається за 30-50 хв.

Проблема полягає в тому, що таких станцій на маршруті усього три та відстані між ними завеликі. Територіально ці станції знаходяться в наступних місцях: 1 - м. Харків, вул. Чувашська, 1; 2 - м. Красноград с. Улянівка; 3 - с. Василівка, автодорога Харків - Сімферополь, 343 км. Відстань між станціями з

можливістю швидкої зарядки № 1 і 2 становить 90 км, а між станціями № 2 і 3 – 238 км.

### Основний матеріал

Основним критерієм для вибору місць розташування ЕЗС на певному маршруті є загальний час витрачений на подолання маршруту, який повинен бути мінімальним (1), а також наявність відповідної інфраструктури для облаштування ЕЗС

$$T_m = T_p + T_z, \quad (1)$$

де  $T_p$  – час, що витрачається на рух, год.;  $T_z$  – час, що витрачається на зарядку електромобіля, год.

Але також необхідно враховувати і існуюче суттєве обмеження при пошуку місць розташування ЕЗС, а саме, фактичну (робочу) місткість акумуляторної батареї електромобілів, яка на пряму впливає на відстань, що може подолати авто на одному повному заряді

Параметри отриманого розподілу наведені в табл. 2.

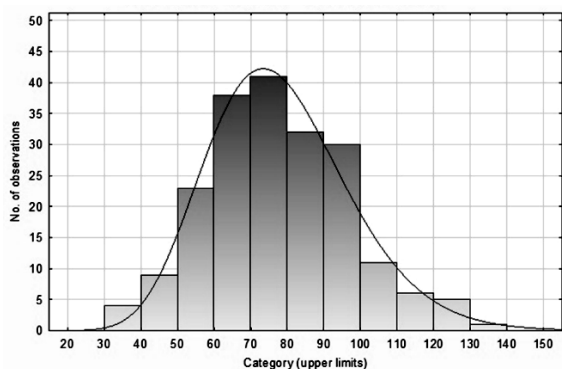


Рис. 5. Гамма-розподіл відстані, що долається електромобілем на одному повному заряді (вісь абсцис – відстань, що долається електромобілем на одному повному заряді; вісь ординат – частота потрапляння значень відстані, що долається електромобілем на одному повному заряді в заданий інтервал)

Таблиця 2 – Параметри гамма-розподілу, придатного для опису відстані, що долається електромобілем на одному повному заряді

Пара-метр форми	Параметр масштабу	Величина тесту Колмогорова-Смирнова	Величина тесту $\chi^2$
16,3	4,9	0,01808	3,009

Отримані результати не протирічать результатам існуючих досліджень [9]. Далі розраховані з використанням програмного продукту STATISTICA 10 параметри гама-розподілу використовуються для розрахунку квантилю [10] гамма-розподілу відстані, що долається електромобілем на одному повному заряді. Розрахунок квантилю гамма-розподілу відстані, що долається електромобілем на одному повному заряді проводиться з використанням програмного додатку MS Excel за допомогою функції «ГАММА.ОБР». При рівні довірчої ймовірності 95 % отримано значення квантилю становить 115 км. Тобто 95 % електромобілів Nissan Leaf з опитаних

не зможуть подолати відстань 115 км на одному повному заряді. Отримане значення відстані є верхньою межею при виборі місць розташування ЕЗС на напрямку Харків – Бердянськ. Виходячи зі значення математичного очікування вибірки, сформованої за результатами опитування власників електромобілів, нижню межу відстані між ЕЗС доцільно встановити на рівні 79 км.

Відстань між ЕЗС у Харкові та Краснограді складає 90 км, тому облаштування нової зарядної станції між цими пунктами маршруту не вимагається. На всіх інших ділянках маршруту нові станції будуть плануватися в місцях громадського користування.

Найбільш проблемними зонами на напрямку Харків – Бердянськ є Дніпропетровська та Запорізька області, кількість швидких зарядок замала та відстань між ними завелика, також проблемою є відсутність такої станції у кінцевій точці маршруту – місті Бердянську.

Також необхідно врахувати вже існуючі ЕЗС, які не розташовуються безпосередньо по маршруту, але знаходяться поруч з ним. Наприклад станція в м. Дніпро, проспект Слобожанський, 31. При заїзді на цю станцію шлях збільшиться на 28 км. З урахуванням вище наведеного на маршруті Харків – Бердянськ пропонується облаштувати 3 нові ЕЗС з можливістю швидкої зарядки у Харківській та Запорізькій областях.

Отримана мережа ЕЗС для маршруту Харків – Бердянськ зображена на рис. 6. Територіальна прив'язка запропонованої мережі зарядних станцій наведена в табл. 3.

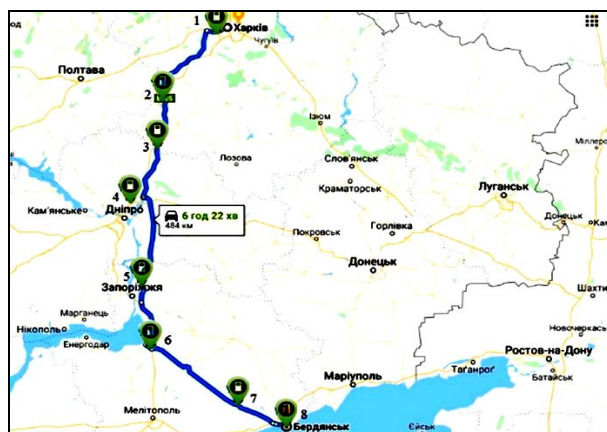


Рис. 6. Сформована мережа швидких ЕЗС на маршруті Харків – Бердянськ

### Висновки

Запропонований підхід визначення місць розташування ЕЗС враховує можливості переважної більшості сучасного парку електромобілів України. Основною для визначення місць розташування є гранична відстань, що може подолати електромобіль на одному повному заряді акумулятора. Отримані результати не можна вважати остаточними в плані визначення місць розташування ЕЗС з швидким режимом зарядки акумуляторів, вони носять лише рекомендаційний характер.



Таблиця 3 – Сформована мережа швидких зарядних станцій

№	Назва ЕЗС	Адреса
1	АЗС WOG	м. Харків, вул. Чувашська, 1
2	АЗС Татнафта	м. Красноград с. Улянівка
3	АЗС ANP	Траса М18, с. Бердянка, Харківська обл.
4	ТЦ «Наша правда»	м. Дніпро, Слобожанський проспект, 31
5	АЗС WOG	м. Запоріжжя, вул. Чарівна, 64 А
6	АЗС WOG	с. Василівка, Запорізька обл., автодорога Харків - Сімферополь, 343 кілометр
7	Кафе «Diana»	Траса Р37, с. Зеленіка, Запорізька обл.
8	ТЦ «Amstor»	обл.. Консульська, 75, м. Бердянськ, Запорізька обл..

Зрозуміло, що з плином часу структура парку електромобілів в Україні буде суттєво змінюватись, тому можливо буде необхідно проведення корегування місць розташування швидких ЕЗС.

Методика щодо визначення кількості АЗС на окремі території, що представлена в ДБН В.1.1-7, може бути адаптована для розрахунку потрібної кількості швидких ЕЗС.

Тоді необхідна кількість швидких ЕЗС становитиме (стан реєстрації 01.07.2019 р.):

Харківська область – 62 од. (zareєстровано 2500 електромобілів);

Дніпропетровська область – 21 од. (zareєстровано 850 електромобілів);

Запорізька область – 11 од. (zareєстровано 450 електромобілів).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В Украине набирает обороты спрос на электрокары: назван лидер [Електронний ресурс] / Газета СЕГОДНЯ. – Режим доступу: <https://www.segodnya.ua/economics/avto/v-ukraine-nabiraet-oboroty-spros-na-elektrokar-y-nazvan-lider-1248702.html/>.
2. Карта станцій зарядки [Електронний ресурс] / PlugShare. – Режим доступу: <https://www.plugshare.com>.
3. Карта електрозарядок [Електронний ресурс] HEVCars. – Режим доступу: <https://hev cars.com.ua/ukraine-charging-stations/>.
4. A Study of the Analytical Method for the Location Planning of Charging Stations for Electric Vehicles [Електронний ресурс] / ResearchGate. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/221019973\\_A\\_Study\\_of\\_the\\_Analytical\\_Method\\_for\\_the\\_Location\\_Planning\\_of\\_Charging\\_Stations\\_for\\_Electric\\_Vehicles/](https://www.researchgate.net/publication/221019973_A_Study_of_the_Analytical_Method_for_the_Location_Planning_of_Charging_Stations_for_Electric_Vehicles/).
5. Dale Hall, Nic Lutsey Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure [Електронний ресурс] / The International Council on Clean Transportation. – Режим доступу: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-charging-best-practices\\_ICCT-white-paper\\_04102017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-charging-best-practices_ICCT-white-paper_04102017_vF.pdf).
6. Методи розміщення зарядних станцій електромобілів [Електронний ресурс] / Сибирський федеральний університет. – Режим доступу: [http://el lib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/125941/pisarev\\_dissertaciya.pdf?sequence=1](http://el lib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/125941/pisarev_dissertaciya.pdf?sequence=1).
7. ДБН В.1.1-7 Автозаправні станції. Основи проектування та будівництва. – Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – 2009. – 73 с.
8. Найпопулярніші літні маршрути українців [Електронний ресурс] / Інтернет-видання Українська правда. – Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2019/09/5/651340/>.
9. Extended Range Electric Vehicle Driving and Charging Behavior Observed Early in the EV Project [Електронний ресурс] / ResearchGate. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/279853330\\_Extended\\_Range\\_Electric\\_Vehicle\\_Driving\\_and\\_Charging\\_Behavior\\_Observed\\_Early\\_in\\_the\\_EV\\_Project](https://www.researchgate.net/publication/279853330_Extended_Range_Electric_Vehicle_Driving_and_Charging_Behavior_Observed_Early_in_the_EV_Project).
10. Квантили розподілений в Excel [Електронний ресурс] / Excel2ru. – Режим доступу: <https://excel2.ru/articles/kvantili-raspredeleniy-ms-excel>.

Received (Надійшла) 23.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.04.2020

### An Approach to Forming of Electromobiles Charging Stations Network in the Kharkiv-Berdyansk Direction

Ye. Liubiyi, D. Larin

**Abstract.** Studying subject in the article is an electric charging stations network of Kharkov – Berdyansk direction. **The aim** of the study is to develop an approach to determine the location of fast electric charging stations. **Research problems:** to analyze the modern Ukrainian electric car park and the existing of charging stations network; analyze existing approaches to the formation of effective electric charging stations networks; to develop an approach to form of charging stations network when driving in intercity traffic, which will take into account the capabilities of the vast majority of electric vehicles in Ukraine; to develop practical recommendations for choosing the location of fast electric charging stations when moving in the Kharkov – Berdyansk direction. **The following results are received:** an approach has been developed to the choice of locations for fast electric charging stations in the Kharkov - Berdyansk direction, which is based on determining the maximum distance that is overcome by an electric vehicle on one full battery charge; places for fast charging stations are proposed. **Conclusions.** The proposed approach to determining the location of fast electric charging stations takes into account the capabilities of the vast majority of the modern electric vehicle fleet of Ukraine. The basis for determining the location of fast charging stations is the maximum distance that is overcome by an electric car on one full battery charge. Using the developed approach, the required number of fast charging stations was established, which for the Kharkov - Berdyansk direction is 8 units. The methodology for determining the number of gas stations, presented in SBC V. 1.1-7, can be adapted to calculate the required number of fast electric charging stations for a certain territory.

**Keywords:** electric car, charging station network, distance to travel, distribution law, long distance communication.

С. В. Очеретенко, Д. С. Огульчанська

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НА ПЕРЕХРЕСТІ

**Анотація.** Розглядаються заходи, які спрямовані на підвищення ефективності функціонування регульованого перехрестя. Розглянути середні затримки транспортних засобів на нерегульованому та регульованому перехрестях. Встановлені моделі, що дозволяють визначити середні затримки транспортних засобів на перехресті в залежності від інтенсивності транспортного потоку по другорядній вулиці та тривалості основного такту. Критерієм вибору тривалості основних тактів світлофорного регулювання прийнято мінімум середніх затримок на перехресті.

**Ключові слова:** регульоване перехрестя, транспортний потік, транспортний засіб, детектор транспорту, затримка транспортних засобів, світлофорний цикл.

### Вступ

Проведений аналіз зміни рівня автомобілізації в містах України за останні десять років показав, що рівень автомобілізації продовжує зростати. Дана обставина викликає збільшення інтенсивності транспортних потоків на транспортних магістралях, що в свою чергу викликає збільшення навантаження на вулично-дорожню транспортну мережу.

У великих містах автомобілі більшу частину часу перебувають в умовах світлофорного регулювання. Тому ефективне управління світлофорами є необхідною умовою для вирішення проблеми транспортних заторів.

Вулично-дорожня мережа за тривалий період не зазнає реконструкції. У зв'язку з цим швидкість руху транспортних засобів по місту значно зменшується. Як відомо [1-5] найбільші проблеми з рухом і найбільші затримки транспортних засобів спостерігаються на перехрестях. Організувати рух на перехрестях можливо, як за допомогою знаків, дорожньої розмітки, так і за допомогою дорожнього обладнання (світлофорів). Найбільш поширений спосіб світлофорного регулювання – використання фіксованих по тривалості фаз, розрахованих на основі статистичних даних. Однак в сучасних умовах динаміка потоків змінюється значно протягом доби.

На перехрестях, на яких організація проїзду здійснюється за допомогою дорожніх знаків, основні затримки виникають у транспортних засобів, які їдуть по другорядній дорозі. Збільшення інтенсивності руху по другорядній дорозі викликає збільшення сумарних затримок на перехресті.

Коли інтенсивність руху автомобілів по другорядній дорозі збільшується, і регулювання за допомогою знаків, і розмітки не забезпечує безпеку руху, то для регулювання руху використовують світлофорну сигналізацію. У цьому випадку потрібно визначити такі параметри світлофорного циклу, щоб затримки транспортних засобів на перехресті були мінімальні [3, 5-7].

Однією з сучасних тенденцій управління дорожнього руху на регульованих перехрестях є застосування адаптивного управління. Для впровадження даного виду управління необхідно використання

різних видів датчиків, які визначають різні параметри руху автомобілів по дорогах.

Відповідно, одним з актуальних питань при оптимізації дорожнього руху на перехрестях є визначення параметрів світлофорного циклу і їх зміни при використанні сучасних датчиків. Так одним з різновидів датчиків є датчик «присутності» автомобіля в зоні перехрестя. Даний датчик дає команду дорожньому контролеру про присутність автомобіля на дорозі і необхідність перемикання сигналів світлофора. Ефективність світлофорного регулювання на таких перехрестях залежить від параметрів світлофорного циклу. Таким чином, для визначення оптимальних параметрів світлофорного циклу необхідно провести аналіз затримок транспортних засобів на перехресті до введення і після введення світлофорного регулювання з використанням сучасних датчиків.

### Аналіз публікацій

Питаннями визначення основних параметрів світлофорного циклу займалися багато вітчизняних і зарубіжних авторів. Одним з перших авторів, який присвятив роботу оптимізації світлофорного циклу є Вебстер. Так само докладно цим питанням приділяли увагу такі автори як Городілін, Дашенко, Усов, Врубель, Ахамандінов М.М, Завалішнін Д.С. [3-5].

Сельянов [8] стверджує, що ефективність використання сигналів світлофорів залежить від двох показників:

- частка сигналу що дозволяє рух від загальної тривалості;
- інтенсивність руху.

Так само велике значення має вибір тривалості циклу.

Так автор Городілін [9] говорить, що тривалість основного такту світлофорного об'єкта визначається завданням, яке ставиться перед дослідником: забезпечити певний напрям руху необхідним відрізком часу для виїзду на перетин проїжджої частини всіх транспортних засобів, що під'їхали до перехрестя за час циклу. Час, необхідний конкретному останньому транспортному засобу, що під'їхав до перехрестя, для отримання права в'їзду на перехрестя, безпосередньо залежить від відстані, яку він по-

винен подолати з моменту відновлення руху на сигнал світлофора, що дозволяє рух до моменту включення заборонного (жовтого) сигналу.

Місце розташування останнього в черзі автомобіля від стоп-лінії ( $S_i$  в'їзду) визначається за формулою

$$S_i = n_i \cdot (B + l), \quad (1)$$

де  $n_i$  – кількість автомобілів на одній смузі руху, що підїхали до перехрестя за час одного циклу роботи світлофорного об'єкта, од.;  $B$  – середня довжина легкового автомобіля (в розрахунках можна приймати рівною 4,5 м);  $l$  – середня дистанція між автомобілями, що стоять перед перехрестям на заборонений сигнал світлофора (в розрахунках може прийматися рівною 1 м).

Кількість автомобілів на одній смузі руху, що підїхали до перехрестя можна визначити за формулою

$$n_i = \frac{N_a^i}{c}, \quad (2)$$

де  $N_a^i$  – інтенсивність транспортного потоку досліджуваного напрямку за час циклу, од./120 с;  $c$  – кількість смуг проїзної частини, призначених для руху в даному напрямку, од.

З урахуванням темпу розгону і затримки перед початком руху  $i$ -ї в черзі на конкретній смузі автомобіль досягне місця, що дає йому право на продовження руху через перехрестя через  $t_{0i}$  (с), яке за змістом збігається з тривалістю основного такту, пропонується визначати за формулою

$$t_{0i} = \sqrt{\frac{2 \cdot (S_i - S_{0ч})}{a}} + t_{затр}, \quad (3)$$

де  $(S_i - S_{0ч})$  – відстань, яку долає автомобіль, що знаходиться останнім в черзі, з моменту початку руху на сигнал світлофора що дозволяє рух до моменту досягнення границі, починаючи з якого водій не буде мати у своєму розпорядженні технічну можливість зупинити транспортний засіб до місця, встановленого Правилами дорожнього руху (стоп-лінія, пішохідний перехід, межа проїжджої частини). В даному випадку таким місцем слід вважати стоп-лінію), м;  $S_{0ч}$  – дальність розташування транспортного засобу щодо границі, регламентованої Правилами дорожнього руху, після досягнення якої водій транспортного засобу не має технічну можливість зупинитися і отримує право продовжити рух через перехрестя, м;  $a$  – прискорення автомобіля,  $\text{м/с}^2$  (для практичних розрахунків приймається 1,5  $\text{м/с}^2$ );  $t_{затр}$  – час затримки початку руху останнього в черзі автомобіля, с.

Загальний час затримки пропонується визначати за формулою

$$t_{затр} = n_i \cdot t_{затр.ср}, \quad (4)$$

де  $t_{затр.ср}$  – середня тривалість часу затримки початку руху кожного автомобіля, що знаходиться в черзі, с (в розрахунках ви користується 1,0 с);

$$S_{0ч} = (t_1 + t_2 + 0,5t_3) \frac{V_a}{3,6} + \frac{V_a^2}{26J_{ж}}, \quad (5)$$

де  $V_a$  – найбільш ймовірна швидкість останнього в черзі транспортного засобу, досягнута їм до моменту включення заборонного сигналу світлофора, км/год (для практичних розрахунків приймається 40 км/год);  $J_{ж}$  – середнє уповільнення транспортного засобу при включенні заборонного (жовтого) сигналу,  $\text{м/с}^2$  (для сухого асфальтового покриття в практичних розрахунках приймається 4,6  $\text{м/с}^2$ );  $t_1$  – час реакції водія транспортного засобу в дорожньо-транспортній ситуації, що склалася, с (для практичних розрахунків приймається 0,6 с);  $t_2$  – час запізнювання спрацювання гальмівного приводу транспортного засобу, с (для практичних розрахунків приймається 0,1 с);  $t_3$  – час наростання уповільнення транспортного засобу в даних дорожніх умовах, с (для практичних розрахунків приймається 0,35 с).

Таким чином, тривалість часу, необхідна для в'їзду на перехрестя останнього в черзі автомобіля, буде визначати час основного такту відповідного напрямку, що дозволяє забезпечити беззаторний проїзд через перехрестя підїхавших до нього транспортних засобів, з урахуванням його конфігурації і кількості смуг, призначених для руху в даному напрямку.

### Суть пропозиції

Вибір тривалості основних тактів світлофорного циклу має великий вплив на ефективність його роботи. Занадто мала тривалість основних тактів призводить до зниження пропускнув спроможності перехрестя, а велика тривалість основних тактів призводить до збільшення транспортних витрат часу. Для визначення оптимальних значень основних тактів необхідно знати закономірності формування потоку автомобілів на підході до світлофора.

Для формування бази даних необхідно провести обстеження.

В якості об'єкту дослідження обрано Т-подібне перехрестя. Основні напрямки руху представлені на рис. 1.

Головною дорогою є дорога в напрямку 1-2, напрямком 3 є другорядною дорогою (рис. 1).

При використанні датчиків присутності на другорядній дорозі організувати управління дорожнім рухом на даному типі перехрестя можна наступним чином:

– якщо на другорядній дорозі немає автотранспортних засобів, то рух по головній дорозі в напрямку 1 - 2, 2 - 1 здійснюється безперервно;

– якщо по другорядній дорозі з'являється транспортний засіб і підїжджає в зону присутності, тоді сигнал світлофора що дозволяє рух включається по другорядній дорозі на певній проміжок часу.

При відсутності датчиків руху і світлофорного регулювання, коли проїзд регулюється за допомогою дорожніх знаків, то основні затримки транспортних засобів виникають на другорядній дорозі, а при великих значеннях інтенсивності по головній дорозі виїзд з другорядної дуже ускладнений.



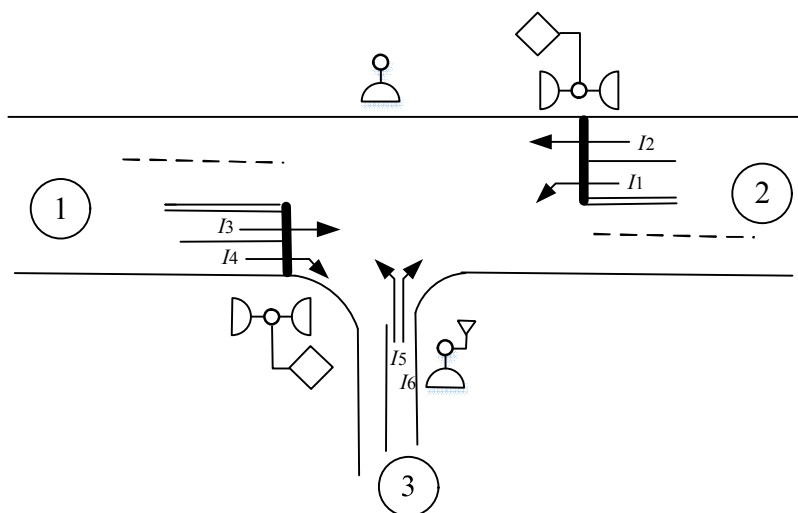


Рис. 1. Організація руху на перехресті

У зв'язку з цією обставиною доцільно впроваджувати на перетині адаптивне світлофорне регулювання.

Коли вводиться світлофорне управління на перехресті, проїзд перехрестя з другорядної дороги значно поліпшується. В цьому випадку затримки транспортних засобів на другорядній дорозі значно зменшуються, але в той же час виникають затримки на головній дорозі.

Поліпшення руху по другорядній дорозі може привести до збільшення інтенсивності руху по другорядній дорозі.

У цьому випадку можливі наступні ситуації:

- інтенсивність по другорядній дорозі низка і перемикання світлофорів відбувається при під'їзді автомобілів;

- інтенсивність транспортного потоку на другорядній дорозі велика і утворюється черга, що викликає постійне перемикання сигналів світлофора і зупинку основного транспортного потоку по головній дорозі, що викликає збільшення затримок на перехресті.

Отже, необхідно визначити такі параметри світлофорного регулювання, щоб при заданих значеннях основних тактів сумарні затримки на перехресті були мінімальні.

Тривалість світлофорного циклу повинна бути визначена за умови мінімум черг і часу затримки транспортних засобів в усіх напрямках.

Загальну аналітичну модель для визначення затримок на регульованому перехресті представимо в наступному вигляді

$$t_{\Delta p} = \frac{\sum_{j=1}^k N_j \cdot t_{\Delta p j}}{\sum_{j=1}^k N_j}, \quad (6)$$

де  $N_j$  – інтенсивність транспортних засобів для  $j$ -го потоку, од./год.

$t_{\Delta p j}$  – середній час затримки транспортних засобів на перехресті для  $j$ -го потоку, с.

$k$  – кількість напрямків руху, од.

Середній час затримки транспортних засобів на регульованому перехресті визначаємо за такою формулою:

$$t_{\Delta p} = 0,9 \left[ \frac{T_{\text{ц}} \cdot (1 - \lambda_i)^2}{2 \cdot (1 - \lambda_i \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot N_{ij} \cdot (1 - x_{ij})} \right], \quad (7)$$

де  $T_{\text{ц}}$  – тривалість циклу регулювання, с;  
 $\lambda$  – відношення тривалості сигналу, що дозволяє рух, до тривалості циклу;

$x$  – ступінь насичення напрямку руху;

$N$  – інтенсивність руху ТЗ, од./год.

Розрахунок затримок на перехресті при відсутності світлофорного регулювання визначають за формулою

$$t_{\Delta u} = \frac{e^{N_r t_r} - N_r t_{\text{тп}} - 1}{N_r - N_b (e^{N_r t_r} - N_r t_{\text{тп}} - 1)} + \frac{v_a}{7,2} \left( \frac{1}{a_r} + \frac{1}{a_p} \right), \quad (8)$$

де  $e$  – підстава натурального логарифма;

$N_r$  – інтенсивність транспортного потоку на головній дорозі в обох напрямках, авт / с;

$N_b$  – інтенсивність, яка припадає в середньому на одну смугу другорядної дороги в цьому напрямку руху, авт / с;

$a_m$  і  $a_p$  – відповідно уповільнення і прискорення автомобіля (в розрахунках можна прийняти

$$a_m = 3 - 4 \text{ м/с}^2; a_p = 1,0 - 1,5 \text{ м/с}^2);$$

$v_a$  – швидкість автомобіля в вільних умовах, км/год.

На досліджуваному перехресті проведено обстеження інтенсивності транспортних потоків. Обстеження проводилося в робочий день з 9:00 до 11:00, з 13:00 до 15:00, з 18:00 до 20:00.

В результаті проведеного обстеження визначені інтенсивності руху транспортного потоку. Отримані значення представлені в табл. 1.

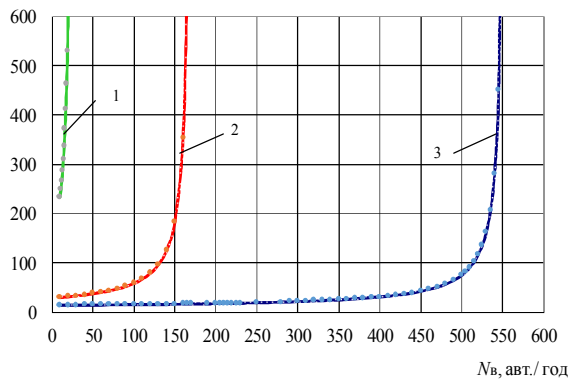
Таблиця 1 – Інтенсивність руху

Потік	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$
Інтенсивність, п.о. / год.	4	1662	990	438	384	16

На основі отриманих даних про інтенсивність транспортних потоків зроблено розрахунок затримок на даному перехресті за формулою (8). На основі отриманих даних проведено моделювання зміни загальних середніх затримок в залежності від різних значень інтенсивності по головній  $N_г$  і другорядній дорозі  $N_в$ . Отримані залежності представлені на рис. 2.

Отже, видно, що при існуючих значеннях інтенсивності по головній і другорядній дорозі значення затримок великі, тому введення світлофорної сигналізації є доцільним.

Для порівняння затримок транспортних засобів на перехресті зробимо розрахунок їх після впровадження світлофорного циклу.



**Рис. 2.** Зміна середньої затримки транспортних засобів на нерегульованому перехресті в залежності від інтенсивності руху по другорядній дорозі:

- 1 – інтенсивності по головній дорозі 2000 авт./год,
- 2 – інтенсивності по головній дорозі 1000 авт./год,
- 3 – інтенсивності по головній дорозі 500 авт./год.

Для визначення ефективності роботи світлофорного циклу та отримання значення існуючих затримок на перехресті проведено обстеження тривалості основних тактів. В результаті натурного обстеження встановлено, що в ранкові години «пік» при відсутності розриву в транспортному потоці по другорядній дорозі час червоного сигналу для головної дороги становить 31 с, а червоний сигнал для другорядної дороги становить 47 с. Час світлофорного циклу становить 82 с. При ситуації, коли існує розрив в транспортному потоці по другорядній дорозі, червоний сигнал для головної дороги становить 31 с, а сигнал що забороняє рух для другорядної дороги змінюється від мінімального значення основного такту – 47 с до моменту під'їзду автотранспортного засобу.

Проведемо розрахунок існуючих затримок автотранспортних засобів на перехресті за умови, що час основного такту, який дозволяє рух для головної дороги, становить 47 с, а для другорядної 31 с. Розрахунок проведемо за формулою (6, 7). На основі

отриманих розрахунків середня затримка автотранспортних засобів для перехрестя складала

$$t_{\Delta p} = 12,375 \text{ с.}$$

У вечірній час при відсутності розриву транспортного потоку значення основного такту що дозволяє рух для головної напрямку відповідає  $t_{гп} = 60$ с, для другорядного напрямку –  $t_{дп} = 18$ с.

Визначимо затримки транспортного потоку для даних значень світлофорного циклу за формулами (6-7). В результаті проведених розрахунків встановлено, що значення затримки відповідає

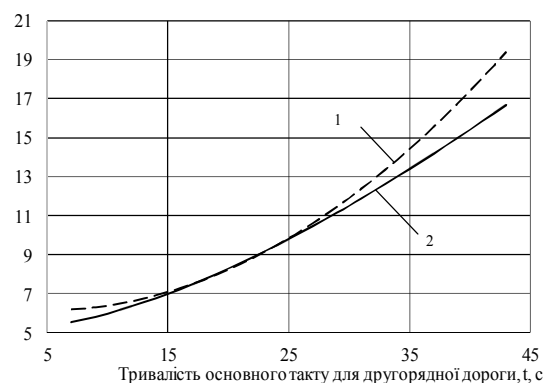
$$t_{\Delta p} = 7,733 \text{ с.}$$

Таким чином, видно, що затримки змінюються.

Проведено порівняльний аналіз тривалості світлофорного циклу і основних тактів. Встановлено, що в ранковий і вечірній час тривалість циклу однакова, але тривалість такту для другорядної дороги збільшена, а для основного транспортного потоку тривалість основного такту зменшена.

Для оцінки ефективності світлофорного циклу зробимо розрахунок зміни середніх затримок на перехресті при зміні тривалості основних тактів, а також при зміні інтенсивності транспортного потоку по другорядній дорозі.

В якості альтернативного способу зміни параметрів світлофорного циклу пропонується змінювати тривалість фази для другорядної дороги відповідно до інтенсивності, а тривалість фази для основного потоку не змінювати. Відповідно до запропонованої методики зроблено розрахунок середніх затримок на перехресті за формулами (6-7). Отримані результати представлені на рис. 3.



**Рис. 3.** Зміна середніх затримок на перехресті в залежності від тривалості основного такту для другорядної дорозі:  
1 – існуюча система;  
2 – запропонована методика.

Аналіз рис. 3 показує, що найменші затримки будуть спостерігатися, якщо використовувати запропоновану методику.

Проведемо розрахунок зміни середніх затримок на перехресті при зміні тривалості основних тактів для другорядного напрямку, а також при зміні інтенсивності транспортного потоку по другорядній дорозі для розглянутих методик. Отримані результати представимо на рис. 4. Аналіз моделей показав, що найменші витрати часу спостерігаються при використанні пропонованого способу зміни тривалості основного такту для другорядної дороги.

### Висновки

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновок, що використання запропонованої методики по зміні тривалості основного такту для другорядної дороги забезпечує найменші затримки транспортних засобів на перехресті при різних значеннях інтенсивності руху. Таким чином, використання даної методики є доцільним.

Отримані залежності дозволяють оцінити наскільки середні затримки транспортних засобів на перехресті будуть менше, якщо використовувати запроповану методику, в порівнянні з існуючою системою управління.

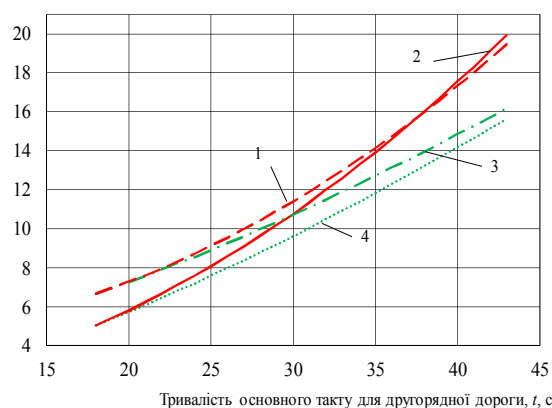


Рис. 4. Зміна середніх затримок на перехресті в залежності від тривалості основного такту на другорядній дорозі:

- 1 – при інтенсивності другорядній дорозі 300 авт/год за існуючою методикою;
- 2 – при інтенсивності другорядній дорозі 100 авт/год за існуючою методикою;
- 3 – при інтенсивності другорядній дорозі 300 авт/год за запропованою методикою;
- 4 – при інтенсивності другорядній дорозі 100 авт/год за запропованою методикою.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клинковштейн Г.И. Организация дорожного движения / Г.И. Клинковштейн – М.: Транспорт, 1981. – 240 с.
2. Уджуху А.З. Применение методик расчета транспортных задержек на практике / Уджуху А.З., Лабутин // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – №3, 2018. – 34-40 с.
3. Григоров М.А Проблемы моделирования и управления движением транспортных потоков в крупных городах: монография / М.А. Григоров, А.Ф. Дащенко, А.В. Усов – Одесса: Астропринт, 2004. – 272 с.
4. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: В двух частях. Часть 2 / Ю.А. Врубель Минск: Белорусский фонд безопасности дорожного движения, 1996. – 306 с.
5. Ахамандин М.М. Математические модели управления транспортными потоками: монография / М.М. Ахамандин, Д.С. Завалишин, Г.А. Тимофеева – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 120 с.
6. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.
7. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – Москва: Академкнига, 2005. – 279 с.
8. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. / В.В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. — 303 с.
9. Городокин В.А. Оптимизация работы светофорного объекта по основным тактам цикла // В.А. Городокин, З.В. Альметова, О.В. Леонова. – Транспорт. Транспортные сооружения. Экология № 4, 2015. – С. 67 – 76.

Received (Надійшла) 02.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2020

### Increasing the efficiency of lighting regulation on crossings

S. Ocheretenko, D. Ohulchanska

**Abstract.** The subject of the study is the change in the average delays of vehicles at regulated intersections with adaptive control when using sensors "presence". The goal is to develop a method by which it is possible to determine the parameters of the traffic light cycle that provide the greatest efficiency of the traffic light object by reducing the average delays at the intersection. **Research objectives:** analysis of existing methods for determining the parameters of the traffic light cycle - the duration of the traffic light cycle and its main measures; determination of the dependence of changes in the average delay of vehicles at an unregulated intersection depending on the intensity of traffic on a secondary road; determination of the dependence of changes in average delays at the intersection depending on the duration of the main cycle for a secondary road at various values of intensity with adaptive control. **The following results are received.** Dependencies are obtained that make it possible to determine the changes in the average delays at the intersection from the duration of the main cycle for a secondary road with existing parameters and proposed parameters determined by the proposed methodology. The dependences of the change in the average delays at the intersection with a change in the duration of the main cycle for the secondary direction, as well as when the intensity of the traffic flow along the secondary road both with existing parameters and those proposed are obtained. **Conclusions.** The question of minimizing the delays of vehicles at intersections directly affects the efficiency of the transport network. Therefore, it is necessary to look for different options to reduce the average delays at intersections. One way is the use of adaptive control and the use of sensors "presence". Using the proposed methodology and the obtained models, it is possible to determine the duration of the main cycle in the traffic light cycle for a secondary road. This will minimize the average delays at the intersection, which in turn will increase the efficiency of its functioning.

**Keywords:** regulated intersection, traffic flow, vehicle, transport detector, delay of vehicles, traffic light cycle.

Ju. Breslavets, M. Nehme

National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, Ukraine

## THE DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL COMPUTER GAMES

**Abstract.** The implementation of information and telecommunication technologies in information processes is aimed at achieving a number of goals: accelerating information processing processes and reducing the cost of their implementation, saving a person from the need to perform routine actions and eliminating the negative impact of the human factor on the result of work. The use of electronic teaching aids, that is, using computer technologies in education, not only allows us to achieve these goals, but also allows us to realize a number of unique features that are not available when using traditional teaching aids.

**Keywords:** the role of educational computer games, development stages, cascading and spiral life cycle.

### Introduction

One of the effective ways of e-learning is the use of training systems in which the components of the game process are implemented - educational computer games. One of the problems with the use of e-learning tools is the loss of trainees' interest in learning. The use of computer games can increase the motivation of students, while retaining all the advantages of e-learning.

The development of computer games requires the use of a large number of specialized software tools. In the process of developing modern games, dozens, and sometimes hundreds of specialists in various fields are involved. When developing educational computer games, the same tools and technological developments are used today for standard logical and strategic computer games. As a result, the efficiency of the game development process is reduced. This is due to several factors:

- The complexity of setting the parameters of the learning management process in the game;
- The lack of the necessary tools for managing educational content;
- The lack of quality management mechanisms for evaluating the developmental game.

Another common option for creating educational games is to incorporate game elements into traditional electronic learning tools. The development of such games takes place using tools designed to build learning systems. As a result of the inappropriateness of these tools to the specifics of game development, in particular the use of inappropriate data formats for storing training content and the inability to organize an interactive game process, the motivational effect of the training computer game is reduced [1].

Using information technology allows you to implement an interactive training mode. The interactivity of the learning mode allows the learner to actively interact with the learning system, which is important for stimulating the learner. Interactivity is especially relevant for self-learning, as well as teaching a large group of people when the teacher is not able to pay enough attention to everyone. A good example of interactive

teaching materials can be computer models of physical processes and phenomena for students - instead of asking the question “what if we do this ...” to the teacher, the student can try to do this and see an adequate model response [2]. The use of virtual computer models (virtual simulators) can significantly reduce the risks that inevitably arise when training a person on real systems. Another important advantage of such models is the significantly lower cost compared to real systems or full-scale simulators. At present, virtual models have been developed that are used to train almost any technical personnel, which not only simulate the behavior of real systems, but also allow you to work out actions in emergency and emergency situations. The most significant contribution was made by virtual models for training.

Medical personnel, pilots, drivers and the military - that is, specialists in those areas where human life can be at the cost of error.

### The purpose and tasks of the publication

The aim of the work is to analyze the development of models, algorithms, and tools for creating computer games with learning elements that allow you to manage the learning process taking into account the features of the interactive game process. Furthermore, The purpose of this publication is to analyze the impact on implementation and on the quality of the developed educational computer games based on cognitive knowledge systems.

### Formulation of the problem

One of the key problems of using electronic learning tools is the loss of motivation achieved in traditional learning through direct communication of the student with the teacher. One of the effective ways to solve the problem of motivation is the use of computer educational games, that is, electronic learning tools that actively interact with the user in a game form. At the same time, the benefits of e-learning remain. The phenomenon of the game has been studied many times, but only in the nineteenth and twentieth centuries did scientific interpretations of this phenomenon appear. One of the most famous works that gives the most complete

picture of the role of game activity in human life is the Johan Huizinga's treatise "The Man Playing", published in 1938. The treatise formulated, and later repeatedly rethought by other researchers, the main characteristics of the game, the most significant of which for the learning process is emotionality and voluntariness of participation. Emotional reward is the main incentive to continue the game as opposed to business activities, in which material incentive is such an incentive. An equally important quality of the gameplay is voluntariness of participation, lack of coercion.

### Brain model

A computer game, as a type of software, has certain specifics that are important in building a model of its life cycle. In software development, two main life cycle models are currently distinguished: cascading and spiral.

The cascade model (Fig. 1) assumes that the transition to the next stage occurs only after the work on the previous one is completed. At each stage, a set of documentation is formed, which is the source data for the tasks of the next stage. The main advantage of this approach is the fixing of requirements and the reduction of possible risks. However, in software development it is very rarely possible to adhere to a rigid framework. Changing requirements in the later stages forces one to return to the early stages and re-do the work done.

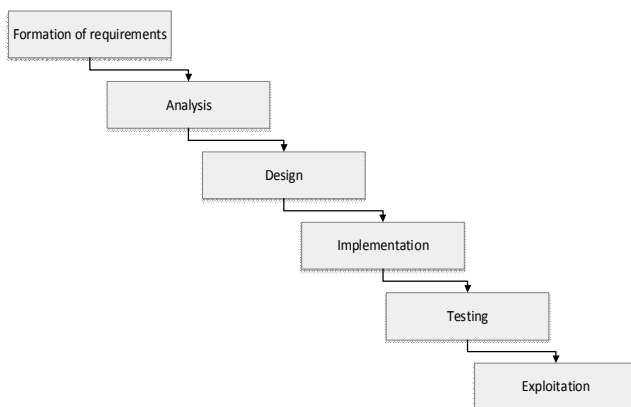


Fig. 1. The Cascading Life Cycle Model

In accordance with the spiral model of the life cycle, it is planned to create a large number of prototypes (versions) of the program. The build-up of the functionality of the program being created is gradual. Making decisions regarding future versions of the program is based on the results of testing intermediate versions. Making changes with the spiral model of the life cycle is much cheaper, since it does not always require a return to the previous stages and the rejection of the work done [5].

The implementation of gaming and training opportunities requires a performance test on test groups. To perform this test, a lot of prototypes are created at the earliest, which implement individual elements of the gameplay or the learning process. Often, the creation of technological prototypes is required to evaluate the fundamental possibility of implementing any elements

of the game. The presence of prototypes that clearly affect the design of the game makes the process of its development similar to a waterfall model [3].

On the other hand, developing software for a game can be a very small part of the labor, and the most time-consuming task of the game development process is to create content. It is often possible to do without programming at all if the software requirements are satisfied by existing solutions.

Making changes that affect the content is expensive even for a waterfall life cycle model [11]. The solution to this problem is a combined life cycle model that has elements of a waterfall model in the development of software and the concept of the game, and a cascade model in the creation of content.

The prototypes use temporary content, the creation of which is significantly less time consuming, or content available from public sources. After performing the necessary checks and clarifying the design of the game, the requirements for most of the content are fixed. In accordance with such a model, the creation of content is postponed to the latest stages of development, and the changes made at these stages are made in such a way as to minimize the loss of content.

### Development of the computer educational games

The development of computer games requires the use of a large number of different tools. Among the main tasks in the development of the game, for the solution of which special tools are used, the following can be attributed:

- creation and editing of multimedia content (two- and three-dimensional graphics, video and sound processing);
- creation and customization of game cards;
- content preparation
- programming and debugging programs [6].

Such tasks could advance improve the educational techniques in various educational institutes [9]. Accordingly, by analogy the quality of the educational computer game can be defined as the totality of the characteristics of the system that determine its ability to provide the required level of knowledge of the student. This ability is determined by many factors: the structure of the training course, the quality of the training content (theoretical materials and practical tasks), the mechanisms used to adapt the learning process to the individual characteristics of the student and the current learning outcomes. The set of quality characteristics related directly to the learning process and the training components of the game makes up the training qualities of the game.

The goal of incorporating game elements into learning systems is to increase the motivation of students. The motivation effect (engagement) of the application of the educational game is determined by the totality of the characteristics that make up its playing qualities: interactivity, competitiveness, plot effects, and multimedia qualities.

The quality of the learning game is not determined by the sum of the playing and learning qualities. On the one hand, the predominance of the learning process, that

is, the suppression of game elements by it for a sufficiently long time, can push the player away, thereby reducing the motivational effect. On the other hand, the predominance of the game process will lead to the fact that the learning process will take a long time, which will reduce the effectiveness of training using the game. The characteristics of the mutual influence, balance, as well as the integrity of the perception of the game and learning processes make up the systemic qualities of the learning game [4].

### **Role of computer educational games in training personnel**

Educational games are introduced widespread in enterprises and firms. Industrial enterprises depend on the educational games to train its employees on practical skills in flexible and advanced way. Educational games are introduced widespread in enterprises and firms. Industrial enterprises depend on the educational games to train its employees on practical skills in flexible and advanced way. Computer educational games helps employees to operate the automative devices in the most efficient way. However, it important for the top management in an enterprise to stay aware and share their recommendations and comments during the designing process of computer educational games. computer educational games should be structured logically to ensure implementation for effective training program [13]. Thus, the implementation process and the designing program of computer educational games must determine the service regulations and personnel job description, and it must be approved by the enterprise management team. L. Kapustina and I. Martynova [14] have made study on the effect on digital transformation for employees in several companies to realize the effect of educational games on employees. they concluded that the educational computer games developed and spread the digital economy in a fast way. Moreover, they concluded that educational computer games motivate trainees to get new knowledge in the operational processes and develop their autonomous decision. Top managers in Deloitte Leadership Academy (one of the international financing and accounting companies in the world) have noted marked improvements in the engagement levels of their employees after they used the computer educational games (GameLearn). GameLearn is a game-based learning platform for corporate training, more than 2000 companies worldwide are already using this platform of serious games training courses specified in internal communication, negotiations, leadership, customer service, time management, cybersecurity, coaching, anti-money laundry, stress management and for creative thinking techniques.

According to the Entertainment Software Association (ESA), 70% of their major employers utilize educational programs to train employees. Employers invest time and resources and reduce risks by depending on educational computer programs [15]. Besides, employers or managers could quickly review the attitude of the employees in the line of operation, since computer educational programs help to identify specific operational characteristics for employees. for example, if one employee

has high social skills, so he could be more productive in the sales department. If another employee has a high concentration in calculations and statistics, so he could be more productive in the financial department. So, from a cognitive aspect, computer educational programs will enhance mental rotation abilities and improve learners' problem-solving skills. from social aspects, computer educational games will find the right job for the right person and will encourage employees to collaborate with each other and respect competition rules.

### **Challenges to overcome for computer educational games**

Computer educational games face several barriers that slow or stop its development and adoption. one of the barriers is that it has to interact with the sustainability factors, such as responding to economic, social and environmental needs and expectations. Recognizing these barriers is crucial to determine the fastest and easiest way to overcome it. Overcoming these barriers could be done efficiently just by systemic coordination and collaboration between funder and developers of computer educational games and between the other stakeholders as industry managers in the enterprise, educational institute or social organization.

Barriers and challenges could be divided into three main categories: the first category is barriers to design and development, the second category is the barriers to innovation, and the third category is barriers to sustainability. [10]

Firstly, barriers to design and development could be the high development cost, where computer educational games are expensive to design and maintain. Another barrier could be the lack of funding for developing computer educational games, where it is difficult to make financial forecast for banks and funders about the expected income and profit that will be gained from such virtual platforms.

Secondly, the barrier for responding to social expectations, in other words, to understand what the market needs. such a barrier could be overcome by making a statistical study for the educational computer games used by consumers in the market, then to analyze it for targeting its limitations and deficiencies. for that designers and programmers could innovate a new program or edit the current one to become more adopted by users and consumers. It is highly recommended to make more researches for the demographic and commercial industry data that depend on computer educational gaming [16].

Thirdly, barriers for designers and producers of educational programs to meet the international quality standards required by international laws and conditions. For example, producers have to meet some environmental standards as depending on renewable energy sources in the line of production.

The new vision to overcome these barriers is to make an environmental and social study for the need of customers in the market, in order to satisfy their expectations in the computer educational games. In addition, targeting the sector is crucial to maintain sustainability and specialty in computer educational games. Moreover, there must be systemic and direct communication

and interaction between the designer, funders, decision makers and managers in the targeted sector (whether it is educational institution or commercial enterprise).

### Conclusions

Finally, educational computer games represent a new technological concept that supports the training systems in various fields. Designing and implementing educational computer games in a rational, systemic and organized way have positive feedbacks on producers and consumers. For producers, it helps in realizing new aspects and innovating new techniques. For consumers, it helps in improving the practical skills in training programs and reduce future risks.

Depending on cognitive system knowledge, combining the life cycle model with the concept of the game could be the idle method for integrating development criteria in the software of computer educational games.

Collaboration between the designers of computer educational games and consumers (employers or managers) is a must to enrich the computer educational

game with the right concepts and specifications. The designs must fit with the training programs and must fit with the work description of trainers.

Innovation in computer educational games is the key factor for its development, and to make it successful it must meet with the sustainable goals of the educational institutions or enterprise.

The development of computer educational games is a modern learning tool based on the adventure that could provide educators with a superior mechanism and virtual environmental knowledge acquired through intrinsic motivations.

Further research could be done in the future to design a united framework for designing and implementing computer educational games for targeted sectors.

### Acknowledgment

This study was done in the System Information laboratory of National Technical University "Kharkiv Polytechnic University" at the faculty Computer Informatics Technology.

### REFERENCES

1. M. Prensky, "Simulations": Are They Games? // From Digital Game-Based Learning. — McGraw-Hill, 2001.
2. S. I. Arkhangelskii, V.P. Myzintsev, Information indicators of the educational process // Programmed training. Yield 11. - Kiev: Higher School 1997, pp. 15-25.
3. A. Rollings, D. Morris, Game Architecture and Design / Andrew Rollings, Dave Morris. — Pearson Education, 2003. — ISBN 0-735-71363-4.
4. G. Pask, Training as a process of creating a management system // Cybernetics and training problems. - M.: Mir, 2002, pp.25-85.
5. A.A. Serkov, V. I. Kovalev, A. A. Fomenko, Construction of teaching systems with elements of adaptation to the student's individuality // Bulletin of the National Technical University KhPI. Series: Informatics and Modeling, 2004, pp.165 - 168.
6. N. V. Berezin Perspectives of creation of adaptive testing system as an element of centralized testing // Scientific journal of MGTU GA, series "Informatics", no. 8, 2001, pp.26-30.
7. S. P. Grushevsky, N. Y. Dobrovolskaya, Yu. V. Koltsov, Organization of the educational process on the basis of a neural network computer training system // Bulletin of the Adygei State University. Series 3, Pedagogy and Psychology, 2008.
8. M. Prensky, Educational game design for online education // Computers in Human Behavior, 2008.
9. E. Boyle, et al, "The role of psychology in understanding the impact of computer games."// Entertainment Computing 2(2), 2011, pp.69-74.
10. A. Ibrahim, et al, "Educational Video Game Design Based on Educational Playability: A Comprehensive and Integrated Literature Review." International Journal On Advances in Intelligent Systems 5(3 and 4), 2012, pp.400-414.
11. O. Kasilov, O. Serkov, J. Breslavets, O. Dziabenko, Methods of creating information content in teaching computer games // Problems of computer science and modeling. Theses of the Sixteenth International Scientific and Technical Conference. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, p.90.
12. M. Heron, P. Belford, H. Reid, M. Crabb, Eighteen months of meeple like us—An exploration into the state of board game accessibility. *Computer Games Journal: Special Issue on Game Accessibility. TBD, 2018.*
13. M. Bakhyt, O. Zhanar, A. Madina, J. Shynara, K. Dinara, B. Olimzhon, A Model of Virtual Training Application for Simulation of Technological Processes. ELSEVIER, Procedia Computer Science 56, 2015 pp.177 – 182.
14. L. V. Kapustina, A. Martynova, Training Employees in the Digital Economy with the Use of Video Games. Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series AISC, vol. 908, pp. 444-454.
15. S. Baer, 5 Game-Based Training Solutions To Engage Millennial Employees, E-learning industry, retrived from <https://elearningindustry.com/5-game-based-training-solutions-engage-millennial-employees>.
16. E. Klopfer, S. Osterweil, K. Salen. Moving Learning Games Forward. The Education Arcade Massachusetts Institute of Technology. Massachusettes 2009, pp. 5-17.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Розвиток навчальних комп'ютерних ігор

Ю. Бреславець, М. Неме

**Анотація.** Впровадження інформаційно-телекомунікаційних технологій в інформаційних процесах спрямоване на досягнення низки цілей: прискорення процесів обробки інформації та зниження витрат на їх реалізацію, рятування людини від необхідності виконувати рутинні дії та усунення негативного впливу людський фактор за результатом праці. Використання електронних навчальних посібників, тобто використання комп'ютерних технологій в освіті, не тільки дозволяє нам досягти цих цілей, але і дозволяє реалізувати низку унікальних особливостей, недоступних при використанні традиційних навчальних посібників.

**Ключові слова:** роль освітніх комп'ютерних ігор, етапи розвитку, каскадний та спіральний життєвий цикл.



O. Haitan<sup>1</sup>, O. Nazarov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## HYBRID APPROACH TO SOLVING OF THE AUTOMATED TIMETABLING PROBLEM IN HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION

**Abstract.** The paper describes a hybrid approach to solving of the automated timetabling problem in higher educational institution based on the ant colony optimization, the genetic algorithm, and the Nelder–Mead method. The ant colony method is the basis of this algorithm, which forms the initial population for the genetic algorithm. The combination of this method with the genetic algorithm and the Nelder–Mead method reduces time of the convergence of an algorithm and eliminates the strong dependence of the results on the initial search parameters, which usually are selected experimentally. The Nelder–Mead method is used to find the parameters of the ant colony optimization method. Use of the genetic algorithm allows for reducing of algorithm running time and increasing of global optimum finding probability. The educational process timetabling in higher school is an important component of the educational process assurance system, since the schedule quality determines the comfort of the educational process participants and its quality and effectiveness. Therefore, the development of methods for computer-aided timetable generation is **an important challenge**. **The subject of study** is adaptive methods of automated university timetabling. **The objective of the work** is development of a hybrid approach to addressing the problem of automated timetabling in university. **The results** are development and research of a hybrid method and software for university timetabling that been implemented this method.

**Keywords:** Multi-Objective Optimization, Ant Colony Optimization, Genetic Algorithm, Nelder–Mead Method, Timetable, Timeslot.

### Introduction

The educational process timetabling in higher school is an important component of the educational process assurance system, since the schedule quality determines the comfort of the educational process participants and its quality and effectiveness.

The task of the university timetabling is characterized by [1]:

- a significant amount of diverse operational information from various structural units of the university, such as departments, deaneries, the educational office, etc.;

- the difficulty in identifying and formalizing the schedule parameters and limitations; quality of taking them into account completely depended upon the experience and qualification of the dispatcher;

- a conflict of interests of the educational process main participants: students and teachers, departments - owners of rooms and specialized equipment, that imposes restrictions on the freedom of their use in the schedule;

- the complexity of adaptation of universal timetabling algorithms to the needs of a particular educational institution, especially taking into account the new working conditions of educational institutions.

Despite the fact that manual timetabling takes a lot of time, it is still widespread due to the significant cost or lack of appropriate computer programs.

Therefore, the study of appropriate methods and the development of effective software for automated timetabling is an important challenge.

The relevance of the development of the effective methods of automated university timetabling has been demonstrated by the international conferences on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT) [2]. PATAT is held biennially and serves as a forum for an international community of researchers

and practitioners on all aspects of computer-aided timetable generation. PATAT-2020 conference will be held on 25 Aug – 28 Aug 2020, Bruges, Belgium. PATAT has been supporting various competitions and challenges, in particular International Timetabling Competition ITC 2019, investing in the timetabling community for the benefit of the field.

This work is concerned with research of the adaptive hybrid method of university timetabling and the development of a software system for the course timetabling. It is envisaged to test the developed system on the real data of National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», at the Educational and Scientific Institute of Information Technologies and Mechatronics.

### Analysis of the problem and problem statement

The problem of computer schedule generation was being considered in many papers. In [3], a survey on the methods for university course timetabling was provided, and their benefits and disadvantages were analyzed. Description of the basic methods used for solving this problem is also presented in [4].

Both classical methods, including linear integer programming [5], graph coloring method [6], simulation modeling [7] etc., and metaheuristic methods, including simulated annealing [8], evolutionary algorithms [9, 10] etc. are widely used for automatic course timetabling. It was noted [11] that most of the classical methods use an iterative technique of continuous optimization, it allows finding only a local optimum, and a global optimum can be found only by chance.

In order to go beyond the local optimum and find a global optimum, let combine the ant colony method with the genetic algorithm which will be run each time after the next iteration of the ant colony method.

So, **the objective of the work** is development of a hybrid approach to addressing the problem of automated

university timetabling which will ensure the creation of a schedule during the allowed time with minimal violation of the schedule restrictions.

**The subject of study** is adaptive methods of automated university course timetabling.

The task of university course timetabling can be presented in a formalized form as follows.

**Input data:**

According to the curriculum there are  $d$  courses  $S_1, S_2, \dots, S_d$  to teach in the current semester: for each  $i, i = \overline{1..d}$  course  $S_i$  consists of  $lec_i$  lectures,  $pract_i$  practical studies and seminars, and  $lab_i$  laboratory studies. Each class  $s$  is held by the teacher  $pr_j$ . There are  $gr$

curricula  $G_1, G_2, \dots, G_{gr}$ , which are sets of courses taught by given student group  $Gr_k$ . It means that courses in  $G_{ik}, k = \overline{1..gr}$  must be scheduled for different periods.

Let  $ts\_max$  be number of time periods (timeslots), and  $r\_max_k$  maximum number of classes, that can be scheduled for period  $t_k$  (number of rooms available at period  $t_k, k = \overline{1..ts\_max}$ ).

It is necessary to schedule classes for all courses within a certain number of rooms and time periods, i.e. find so  $s_{tr}^{ijk}$  ( $i = \overline{1..d}, j = \overline{1..pr}, k = \overline{1..gr}, t = \overline{1..ts}, r = \overline{1..r\_max}$ ), that

$$\forall i = \overline{1..d} \sum \{s_{tr}^{ijk} | j \in Pr, k \in Gr, t \in Ts, r \in R\} = lec_i + pract_i + lab_i - \text{scheduling of all classes};$$

$$\forall t = \overline{1..ts\_max} \sum \{s_{tr}^{ijk} | i \in D, j \in Pr, k \in Gr, t \in Ts, r \in R\} \leq r\_max_t - \text{use of limited room quantity};$$

$$\forall t = \overline{1..ts\_max} \forall r = \overline{1..r\_max} \sum \{s_{tr}^{ijk} | i \in D, j \in Pr, k \in Gr, t \in Ts\} \leq 1 - \text{absence of room overlaps};$$

$$\forall t = \overline{1..ts\_max} \forall k = \overline{1..gr} \sum \{s_{tr}^{ijk} | i \in D, i \in G_k, j \in Pr, t \in Ts, r \in R\} \leq 1 - \text{absence of group overlaps};$$

$$\forall t = \overline{1..ts\_max} \forall j = \overline{1..pr} \sum \{s_{tr}^{ijk} | i \in D, k \in Gr, t \in Ts, r \in R\} \leq 1 - \text{absence of teacher overlaps}.$$

The schedule restrictions can be structured as follows (Fig. 1).

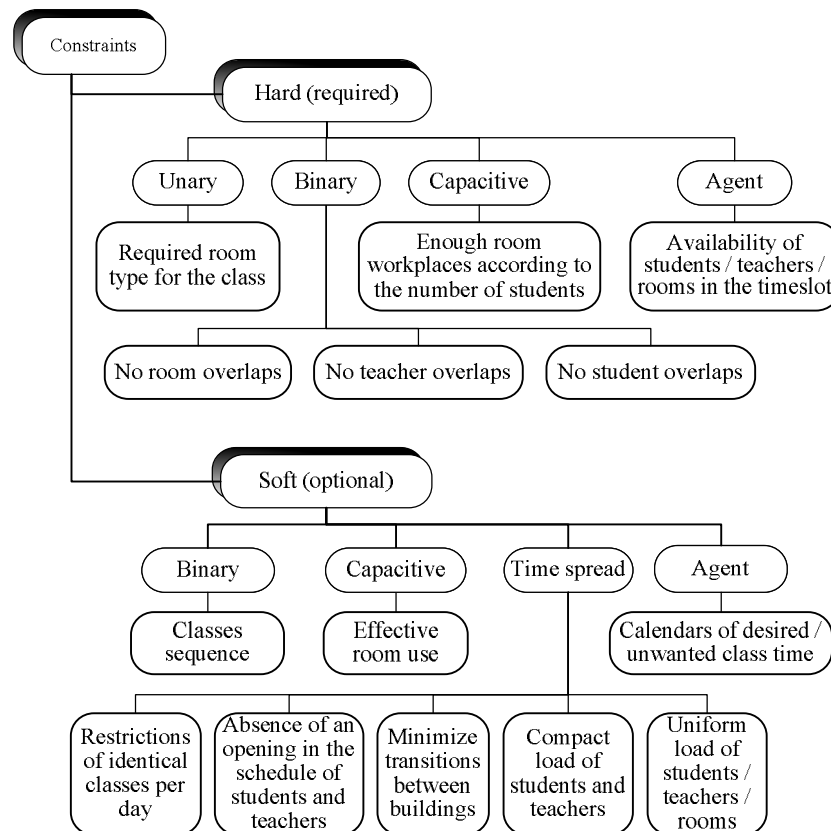


Fig. 1. Restrictions of the generated schedule

**Basic material and results**

The teaching process unit and therefore the schedule unit is class (lesson).

The class (lesson) is characterized by a triple <Course, group, teacher> (Fig. 2).

Each student can be part of an academic group, subgroup, generalized group (stream), or virtual group.

Lectures on the same course are held by one teacher for all groups of the stream at the same time; therefore, it is necessary to ensure the concept of a generalized group (stream).

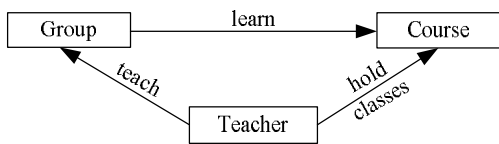


Fig. 2. Triple <Course, group, teacher>

Since students can choose courses to teach (from list presented in optional block of a curriculum), it is necessary to form temporary (virtual) groups from various academic groups to teach a specific discipline. In different subgroups of the same academic group classes can be held at the same time, if they are held by different teachers.

Classes in physical education or disciplines of the humanitarian block, such as philosophy, sociology, religion, etc., can be held simultaneously for all students of one level by various teachers of the department, therefore, it is necessary to introduce the concept of a generalized teacher, which consists of real teachers.

A teacher may not be associated with real teachers if this class is held by an external person, for example, a representative of the business or industry

organizations. In this case we introduce the concept of a virtual teacher.

Timetabling for such generalized groups and teachers requires controlling the employment of all academic groups and all real teachers as the part of these unions.

Therefore, the triple <Course, group, teacher> takes the following form (Fig. 3).

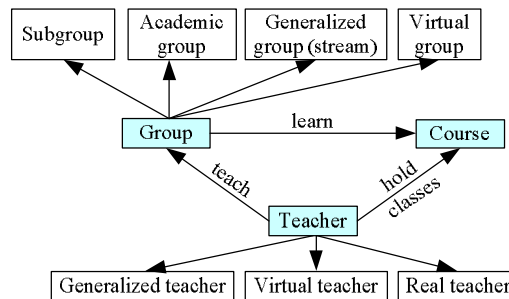


Fig. 3. Relationship among the class entities

The class diagram, which describes the relationship between these entities, is presented in Fig. 4.

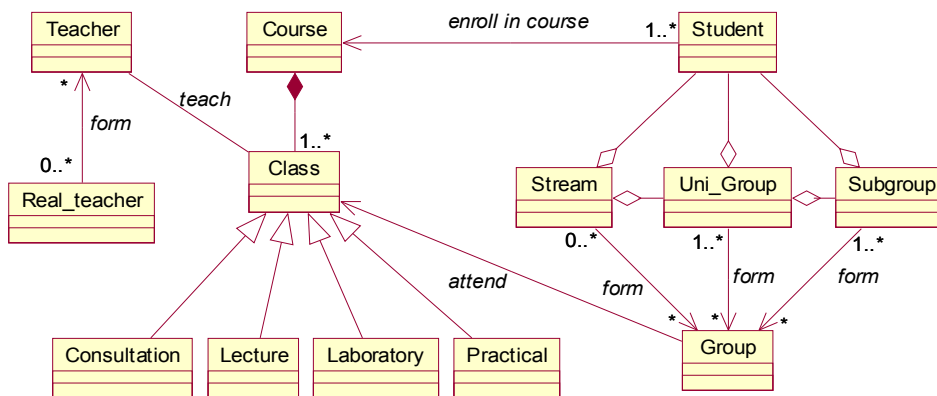


Fig. 4. The class diagram

**1. Representation of classes in a schedule**

Let use the matrix representation of the schedule in the algorithm. The most optimal schedule presentation is the parallelogram form, where axes are room, day and time, their intersection is class [12]. In this case, only the class number is indicated, by which it is possible to identify uniquely the teacher, group and course.

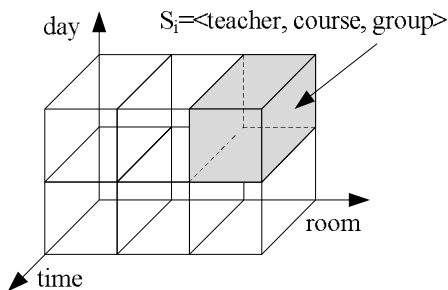


Fig. 5. Representation of the classes in the schedule

Such a presentation will ensure that there are no room overlaps and the possibility of quick data selection

and visualization, for example, using OLAP technologies. Mathematically we describe this parallelogram in the form of a three-dimensional matrix *candidate\_list*.

$$candidate\_list \{room, day, time\} = \begin{cases} i, & \text{if } S_i \text{ is taken on day, time in room;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

Relationship among the classes in the overall schedule of the educational institution is represented in the form of *union matrix* and *conflict matrix*, which are created according to the curriculum.

The union matrix is a formalization of the streaming. Classes  $S_i$  and  $S_j$ , for which  $M\_union_{ij} = 1$ , are held simultaneously in the same room.

The union matrix is formed as follows:

$$\forall (s_i, s_j) | s_i \in S, s_j \in S ((s_i^{ducu} = s_j^{ducu}) \wedge (s_i^{kurs} = s_j^{kurs}) \wedge (s_i^{spec} = s_j^{spec}) \wedge (s_i^{lec} \wedge s_j^{lec} \wedge (s_i^{modul} = s_j^{modul})) \rightarrow M\_union_{ij} = 1. \quad (2)$$

The conflict matrix is a formalization of the requirement that two classes cannot overlap at a time because of presence of one group / subgroup or teacher in these classes.

Classes  $S_i$  and  $S_j$ , for which  $M\_conflict_{ij} = 1$ , cannot be taught at the same time.

The conflict matrix is formed as follows:

$$\begin{aligned} & \forall (s_i, s_j) \mid s_i \in S, s_j \in S ((i \neq j) \wedge (M\_union_{ij} = 0) \wedge \\ & ((s_i^{pr} = s_j^{pr}) \vee ((s_i^{gr} = s_j^{gr}) \wedge (s_i^{subgr} = s_j^{subgr}))) \vee \\ & ((s_i^{gr} = s_j^{gr}) \wedge (\neg s_i^{subgr} \vee \neg s_j^{subgr}))) \rightarrow M\_conflict_{ij} = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

## 2. Used methods

### 2.1 Ant colony optimization method

The ant colony method is a probabilistic technique for solving the computational problems, which can be reduced to finding the best ways with help of graphs using artificial ants that inherit the behavior of natural ant colony.

This iterative algorithm is based on the idea of successive approximations to the optimal solution.

Each iteration is the launch of an artificial ant that, according to some rule, tries to choose the best route to “food” (optimum function), using the labels of its predecessors.

Each ant performs a chain of steps:

1. Ant moves from node to node with transition probabilities. In order to determine the next edge of the path, the probability of transition to the  $j$ -th node is calculated when the agent is in the  $i$ -th node:

$$P_{ij} = \frac{(\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)}{\sum (\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)}, \quad (4)$$

where  $\tau_{i,j}^\alpha$  is the amount of pheromones in the node  $i, j$  (accumulated statistical information on the quality of choice for position  $i$  of requirement  $j$ );  $\alpha$  is a parameter to control the influence of  $\tau_{i,j}^\alpha$ ;  $\eta_{i,j}^\beta$  is node attractiveness (heuristic information about the quality of choice for position  $i$  of requirement  $j$ );  $\beta$  is a parameter to control the influence of  $\eta_{i,j}^\beta$ .

2. Recalculation (updating) of the pheromone trace (production and evaporation of the pheromone) is carried out according to the formulas:

$$\tau_{i,j} = (1 - \rho)\tau_{i,j} + \Delta\tau_{i,j}, \quad (5)$$

where  $\tau_{i,j}$  is the amount of pheromone deposited on the node  $i, j$  (global pheromone trace);  $\rho$  is the pheromone evaporation coefficient;  $\Delta\tau_{i,j}$  is the amount of pheromone deposited by the current ant (local pheromone trace).

3. The best solution is the one with the highest value of the local pheromone trace.

Several extensions of the ant system method were developed [13], which include: Elitist Ant System; Rank-

based Ant System (ASrank); Ant Colony System (ACS); Max-Min Ant System (MAX-MIN AS – MMAS).

In this case, we will use the ant colony system (ACS) method, which accumulates benefits and improves other methods.

ACS uses a pseudo-proportional rule to determine the next node to move [13]: with probability  $q_0$ , the agent moves to the point for which the product of the pheromones quantity and heuristic information is maximum; with probability  $1 - q_0$  the basic approach that described in the method of ant systems will be applied in determining the next point for the transition.

In this case, a strict elite strategy is used while restoring pheromones on the edges. Only the best agent (globally or locally) adds pheromones after each iteration of the method.

The ant colony method has been developed in detail for the traveling salesman problem (TSP), but the works on course timetabling with this method contain only general theoretical consideration of the possibility of using this method for this task.

The use of the ant colony method for solving optimization problems was considered in [13]. In [14] the timetabling tool based on Best-Worst Ant System and Best-Worst Ant Colony System is considered.

The advantages of the ant colony method are the convergence to the optimal solution, as well as stochasticity, that is, random search, which eliminates the possibility of looping in a local optimum.

At the same time, the uncertainty of the convergence time is noted in [13], while the convergence is guaranteed; a strong dependence of the method results on the initial search parameters, which are selected experimentally.

Therefore, in our opinion, the use of a hybrid approach is an effective approach. The ACS algorithm provides good results in combination with other methods, for example, with local search or genetic algorithms.

#### 2.1.1 Parameters of the algorithm

The initial algorithm parameters, which affect the speed and quality of the solution, are the parameters of influence  $\alpha$ ,  $\beta$ , and attractiveness of the node  $\eta_{i,j}^\beta$ . Let consider formation of these parameters.

The parameters of influence  $\alpha$  and  $\beta$  are usually selected experimentally. We use the Nelder–Mead method to determine these parameters.

**The Nelder–Mead method** (also downhill simplex method) is a simple and effective method for optimizing (finding of minimum or maximum) of an objective function in a multidimensional space; it is a way to optimize functions without using gradients. The method is reliable and, as a rule, shows good results, while there is no convergence theory.

The algorithm is generation of the simplex and its further deformation in the direction of minimum using three operations: reflection, expansion, and contract.

In order to form a simplex we divide the ant colony into three groups, for each of which we set individual parameters of the method:

$$\alpha_1 = \text{random}(0.5, 1), \beta_1 = \text{random}(0, 0.5) - \tau_{i,j}^\alpha \text{ is dominant};$$

$$\alpha_2 = 0,5, \beta_2 = 0,5 - \text{uniform influence of } \tau_{i,j}^\alpha \text{ and } \eta_{i,j}^\beta;$$

$$\alpha_3 = \text{random}(0, 0.5), \beta_3 = \text{random}(0.5, 1) - \eta_{i,j}^\beta \text{ is dominant.}$$

If the necessary solution is not reached during *iteration\_max* iterations, it is necessary to change the parameters of the ant colony method, calculating the new ones using the downhill simplex method.

In this case, the current value of the parameters  $v_1 = (\alpha_1, \beta_1), v_2 = (\alpha_2, \beta_2), v_3 = (\alpha_3, \beta_3)$  is selected as the initial simplex.

Using the Nelder-Mead method requires to calculate the value of the objective function at each point  $f_1(\alpha_1, \beta_1), f_2(\alpha_2, \beta_2), f_3(\alpha_3, \beta_3)$ , whose equation does not exist, so the maximum local pheromone trace during *i* iterations in each group of ants is taken as this value.

Sorting the points by the values of the objective function at these points, we obtain a double inequality:

$$f(\text{worst}) \leq f(\text{good}) \leq f(\text{best}). \quad (6)$$

Let use the operation of reflection; it is the projection of *worst* point through the center of gravity:

$$\text{new} = \text{mid} + a(\text{mid} - \text{worst}), \quad (7)$$

$$\text{mid} = ((\alpha_{\text{good}} + \alpha_{\text{best}})/2; (\beta_{\text{good}} + \beta_{\text{best}})/2),$$

where  $a = 1$ .

We get 3 sets of parameters that are selected as the current simplex  $v_1 = \text{best}, v_2 = \text{good}, v_3 = \text{new}$ .

The algorithm is repeated until the desired schedule is obtained or during *iteration\_max* iterations with a new set of parameters.

If the necessary solution is not reached during *iteration\_max* iterations, it is necessary to change the parameters of the ant colony method, calculating the new ones similar to the previous paragraph, but instead of the reflection, use the expansion operation according to the formula:

$$\text{new} = \text{mid} + \gamma(\text{worst} - \text{min}), \quad (8)$$

where  $\gamma = 2$ .

The algorithm is repeated until the desired schedule is obtained or during *iteration\_max* iterations with a new set of parameters.

If the necessary solution is not reached during *iteration\_max* iterations, it is necessary to change the parameters of the ant colony method, calculating the new ones similar to the previous paragraph, but instead of the expansion, use the contract operation according to the formula:

$$\text{new} = \text{mid} + \beta(\text{worst} - \text{min}), \quad (9)$$

where  $\beta = 0,5$ .

$\eta_{i,j}^\beta$  is heuristic information about attractiveness of location of class *i* on position *j* in the schedule.

This parameter is calculated heuristically by one of the rules:

1. Under the general rule:

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{s\_max} \text{ (uniform distribution when there is}$$

no information about the benefits);

2. Under the rule of subjective preferences or fuzzy measure.

With the help of a fuzzy measure, the convenience of placing classes on day *d* in time *p* is defined as a subjective probabilistic measure (Fig. 6).

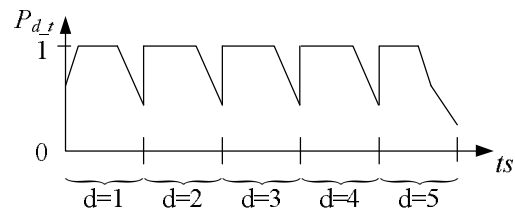


Fig. 6. Subjective probabilistic measure

It is undesirable to hold a lecture on the first lesson on Monday, daily on the fifth or sixth lessons and on the last lessons of the last day of the week, when workability decreases and the least number of students is present. For example,  $p_{d,t} = 0$  for  $d = 6$  at 5-day workweek,  $p_{d,t} = 0,2$  for  $p = 6$  (undesirable lecture on the last lesson). The convenience of taking a class in the *r*-th room is determined by the compliance of the room type to the class type, capacitive room indicators, belonging of room to the department, necessary laboratory equipment, software and hardware, as well as the subjective preferences of the teacher. The simplest definition:  $\mu_r = 1$  at full conformity of the room,  $\mu_r = 0$  at complete discrepancy of the room,  $\mu_r = 0,5$  at undesirable taking of class in this room.

According to  $\mu_{d,t}$  and  $\mu_r$ , parameter  $\eta_{i,j}$  is defined:

$$\eta_{i,j} = \max(\mu_{d,t} \cdot \mu_r), \quad (10)$$

where  $0 \leq \mu_{d,t} \leq 1$  is the convenience of scheduling classes on day *d* in time *t*;  $0 \leq \mu_r \leq 1$  – is the convenience of scheduling classes in *r*-th room. Such a presentation allows taking into account the wishes of the educational process participants during course timetabling. If  $\beta > \alpha$  at the iteration  $i = 1, \dots, N$ , an unallocated position with the highest value  $\eta_{i,j}$  is selected.

**The pheromone trace.** In the classical ant colony algorithm, implemented, for example, for the traveling salesman problem, the pheromone is applied to the graph edges, since the edge is a transition path from point to point.

In this case, the main sources of information in the graph are the vertices (timeslot / audience combination), therefore, it is proposed to put the pheromone on the vertices, and not on the graph edges.

### 2.2 Genetic algorithms

Genetic algorithms are the stochastic heuristic optimization methods, the main idea of which is taken from the evolutionary theory [4]. The main mechanism of evolution is natural selection, whose essence is that more adapted individuals are more likely to survive and reproduce and, accordingly, bring more offspring than less adapted individuals. Moreover, due to the transfer of genetic information, descendants inherit their main qualities from their parents. The procedure of the genetic algorithm:

1. A chromosome structure for storage of solutions is being developed. In this case the schedule as a “chromosome” is considered. The selected structure should take into account all the features and restrictions of the desired solution. An initial chromosomes form population.

2. Each individual in the population is evaluated using the fitness function; the best solutions are copied to the new population unchanged. The fitness function determines the suitability of the chromosome for the formation of the next generation. The principle of elitism allows saving the best decisions and provides increased convergence of the algorithm.

3. The best chromosomes are selected for further reproduction from the set of chromosomes using their fitness function.

4. Selected chromosomes cross-pair with each other to obtain a new population. If the received schedule does not conform to the curriculum, the crossover operation is repeated until the correct schedule is received. In this case, it is better to provide a heuristic mechanism for schedule correcting.

5. The mutation operator is applied to the population.

6. The fitness function is recalculated for the resulting population

7. Go to the step 2.

The genetic algorithm is stable to local minimums, and also provides a relatively quick search.

But application of the evolutionary method for solving the timetabling task causes the problem of

chromosome formation. Therefore, it will be relevant using a combination of the considered approaches – the ant colony algorithm for iterative approximation to the optimum and the initial chromosome formation, and the genetic algorithm for search of the global optimum.

The use of genetic algorithms for timetabling is presented in [4, 9, 11, 15].

### 3. Hybrid course timetabling method

Let’s consider the main stages of the hybrid method.

Let’s introduce the following variables:  $s\_max$  is a total number of classes according to the curriculum,  $d\_max$  is a number of teaching days during the week,  $p\_max$  is a maximum number of classes per day,  $t\_max = d\_max \times p\_max$  is a number of timeslots during the week,  $r\_max$  is a number of rooms,  $S$  is an array of unallocated classes.

#### Step 1. Initialization of the method.

1.1 Creation of the classes array  $S$  with dimension  $s\_max$  and its sorting by decreasing freedom of location. First of all, classes that have limited opportunities for the time of the classes or require large rooms are located.

1.2 Creation the *Pheromone\_matrix*  $\{s_i, t_j, r_k\}$  with dimension  $s\_max \times t\_max \times r\_max$  and initialization it with the initial pheromone value at the vertices *Pheromone\_start* for the implementation of the ant colony method.

1.3 Creation of an of artificial ant colony (agents)  $ants[]$ . For each ant it is determined: *candidate\_list*  $\{r_i, d_j, p_k\}$  with dimension  $r\_max \times d\_max \times p\_max$ , ant path *ant\_tour* with dimension  $s\_max$ , which are initialized with zero values.

1.4 Separation of the ant colony of into three groups for the formation of a simplex by the Nelder-Mead method. For each ant group the initial parameters of the method  $\langle \alpha_1, \beta_1 \rangle, \langle \alpha_2, \beta_2 \rangle, \langle \alpha_3, \beta_3 \rangle$  are set.

#### Step 2. Iterative movement of ants (Fig. 7).

2.1 Setting the initial values of the path, initialization of *candidate\_list* and *ant\_tour* with zero values.

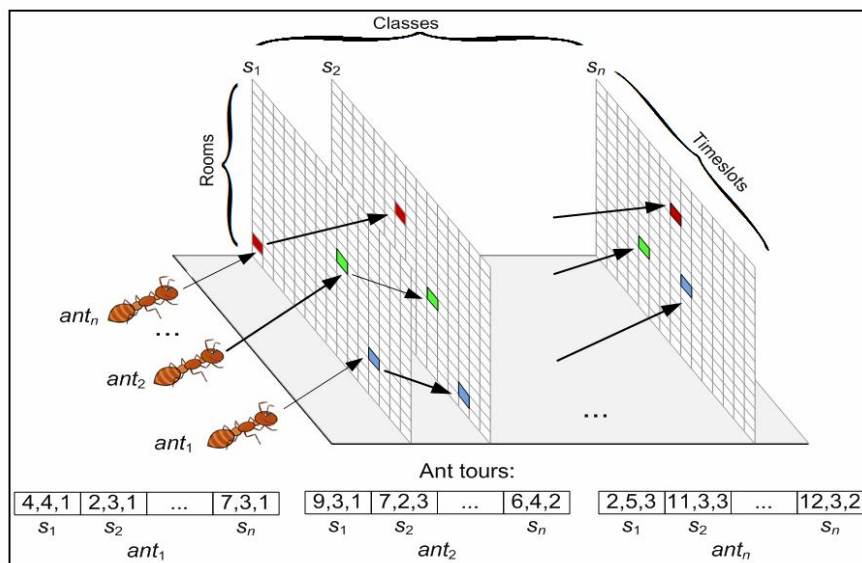


Fig. 7. Schematic representation of the ant path

2.2 Each class  $i$  is sequentially scheduled on position  $j$  using the transition probabilities. Ant moves from node to node with probability:

$$p_{ij} = \frac{(\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)}{\sum (\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)}, j \in \Omega, \quad (11)$$

where  $\Omega$  is the set of classes not scheduled yet.

The rule by which class  $i$  is located on position  $j$  is defined as follows:

$$j = \begin{cases} \arg \max_{h \in \Omega} (\tau_{i,h}^\alpha)(\eta_{i,h}^\beta), q < q_0; \\ j \text{ is determined randomly} \\ \text{according to the probability} \\ \text{distribution, } q \geq q_0, \end{cases} \quad (12)$$

where  $0 \leq q_0 \leq 1$  is the algorithm parameter ( $q_0 = 0.5$ ), and the value  $q$  is calculated randomly at each step.

The result of the selection is fixed in the ant path (*ant\_tour* matrix) and *candidate\_list* matrix.

An agent moves only to nodes that have not been visited yet and for which *candidate\_list*  $\{r_i, d_j, p_k\} = 0$ .

In this case, the *candidate\_list* matrix plays the role of a tabu list and ensures the satisfying of hard restrictions “no room overlaps”. Absence of the teacher and group overlaps must be controlled separately.

Step 2.2 is repeated until each agent completes his path.

2.3 Calculation of the fitness (penalty) function  $F$  by the formula:

$$F = \sum_j \omega_j F_j, \quad (13)$$

where  $F$  is the schedule quality (the number of violations of soft restrictions);  $F_j$  is the number of violations of soft restrictions according to the  $j$ -th quality criterion;  $\omega_j$  is the weight coefficient of the  $j$ -th quality criterion.

2.4 Application of the local search method and recalculation of the target (penalty) function  $F$ .

Local search methods:

Option 1:

– random class  $S_0(r_0, d_0, t_0)$  is selected in the schedule;

– all classes  $S_1(r_1, d_1, t_1) \dots S_n(r_n, d_n, t_n)$  with the same timeslot ( $d_0, t_0$ ) are considered;

– classes  $i$  and  $j$  alternately change places, while the objective function is recalculated;

– a replacement that gives the best value of the objective function is fixed, other classes return to their positions.

Such change will improve the schedule according to the criteria “effective room use” and “uniform room load”. Since the time of the classes does not change, there are no violations of strict restrictions.

Option 2:

– random class  $S_i(r_i, d_i, t_i)$  is selected in the schedule;

– class  $S_i$  is transferred to all vacant positions in turn, while the fitness function is recalculated;

– a replacement that gives the best value of the ob-

jective function is fixed, other classes return to their positions.

Such change will improve the schedule according to the criteria “compact load of teachers and students” and “uniform load of educational process participants”.

These options of local search can be considered as a genetic algorithm that is applied to one individual: example 1 is selection operation, example 2 is mutation operation.

2.5. The local trace is determined – the amount of pheromone deposited by the  $i$ -th ant on each vertex of the path, according to the formula:

$$\Delta \tau_{i,j} = \frac{1}{1 + F_i}, \quad (14)$$

where  $\Delta \tau_{i,j}$  is the amount of pheromone deposited by the  $i$ -th ant;  $F_i$  is penalty for violation of soft restrictions in the schedule created by the  $i$ -th ant.

For each group of ants, the largest value of the local pheromone trace is calculated and stored.

2.6. The global trace in the pheromone matrix is calculated by the formula:

$$\tau_{i,j} = (1 - \rho)\tau_{i,j} + \Delta \tau_{i,j}, \quad (15)$$

if class  $i$  is on the position  $j$  in the best schedule.

Otherwise,

$$\tau_{i,j} = (1 - \rho)\tau_{i,j}, \quad (16)$$

where  $\rho$  is the rate of the pheromone evaporation, uniformly distributed in the range  $[0,1]$ .

At the first iteration, each vertex has the opportunity to be selected. To gradually remove the vertices relevant to the worst positions, the pheromone evaporation procedure is applied to all the vertices.

If  $|ant\_tour^{best} - ant\_tour^{worst}| < \varepsilon$ , the pheromone matrix must be restarted.

Schedules obtained by the ant colony method and improved by local search are transferred to the genetic algorithm as chromosomes.

**Step 3. Genetic algorithm**

3.1 On the basis of fitness functions, the best chromosomes in each ant group are selected for further reproduction and the creation of a new generation with the best indicators.

3.2 Selected chromosomes cross-pair with each other to obtain a new population, exchanging rooms or timeslots. Genes for crossover (classes) are chosen by the roulette-wheel method. The resulting chromosome is checked for validity – whether it satisfies the hard restrictions. If the received schedule does not conform to the curriculum or the crossover worsened the room use indicators, the crossover operation is repeated until the correct schedule is received.

3.3 Mutation operator is applied to a population. It is a random replacement of a room or timeslot.

3.4 The objective function (fitness function), which fixes the satisfying of soft restrictions, and the local pheromone trace are recalculated for the resulting population.



Steps 2 – 3 are performed until the desired schedule is obtained or during *iteration\_max* iterations.

The algorithm stops after achievement of the desired result or after *iteration\_max* iterations, as well as if during the *i* iterations the algorithm does not give a significant improvement i.e.

$$F_{global\_best} - F_i < \varepsilon .$$

Schematically, the work of the genetic algorithm is presented in fig. 8.

The algorithm flowchart is presented in fig. 9.

Software for university course timetabling was developed based on this hybrid algorithm.

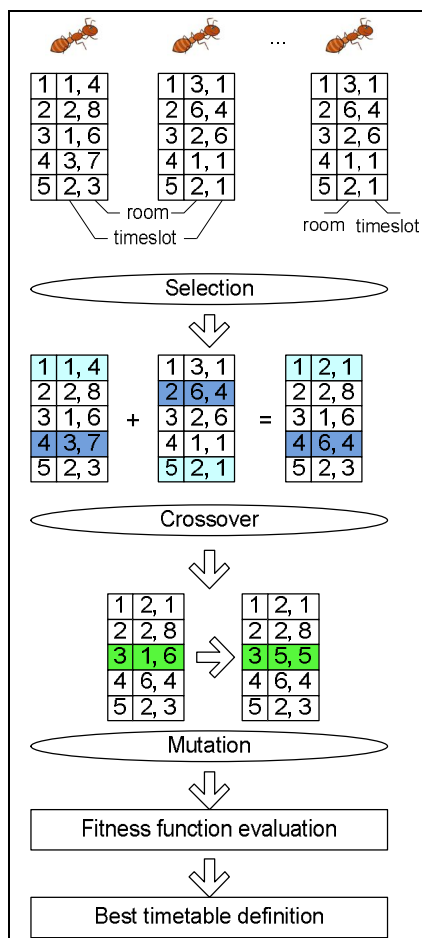


Fig. 8. Genetic algorithm

It provides the possibility of manual and automated course timetabling for higher education institution using the discussed methods and drag-and-drop technologies. The permanent data is stored in the sql-database, and operational semester information is imported from xml files.

The screenshots demonstrating room data updating and manual course timetabling are presented in Fig. 10, 11.

The fragment of the schedule that has generated as a result of aromatic timetabling is presented in Fig. 12.

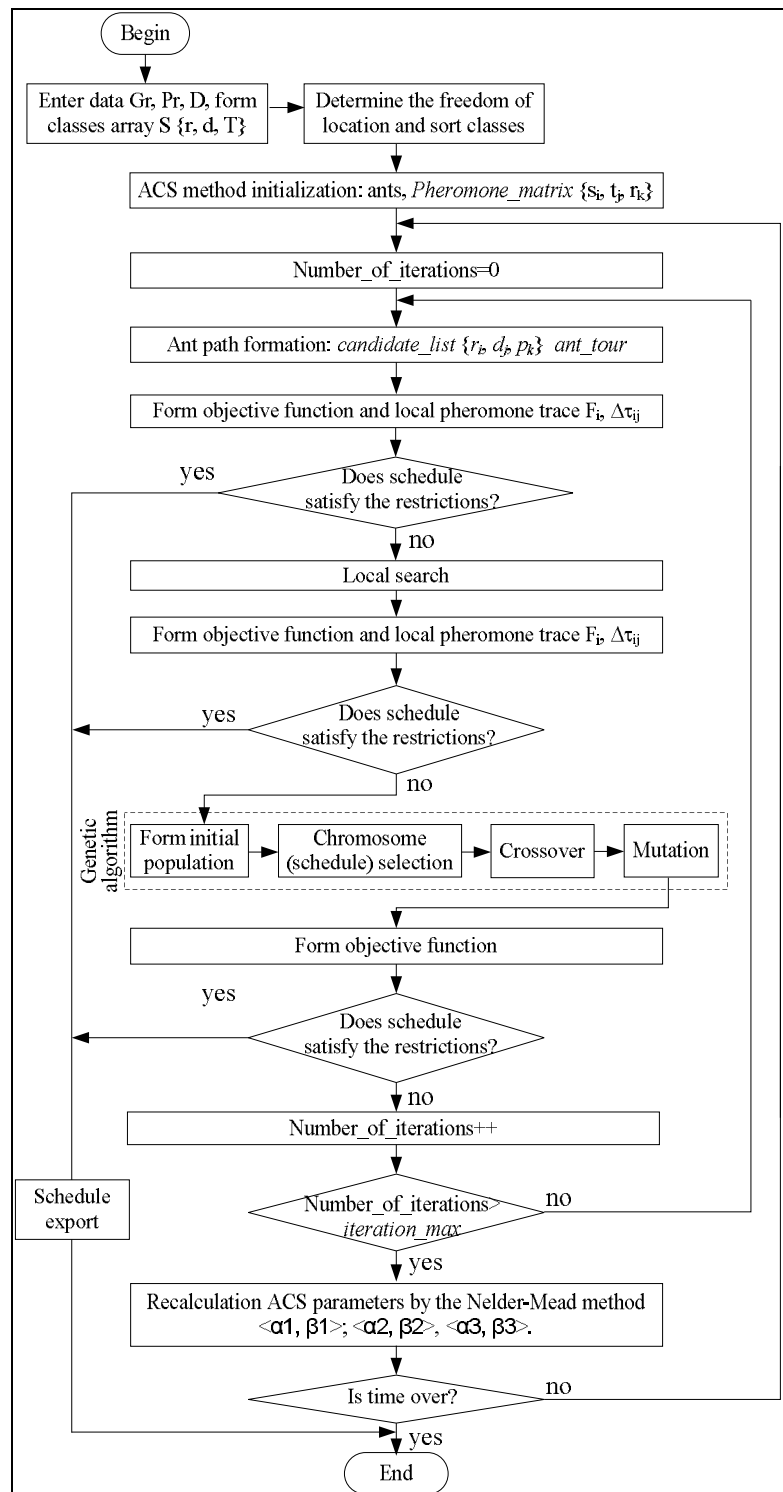


Fig. 9. The algorithm flowchart

The default restriction weights are equal 1, but it is possible to adjust them in manual mode, as well as taking into account individual quality criteria.

The developed system was tested on the following data:

- 1 faculty,
- 56 teachers,
- 54 groups,
- 20 classrooms.

Testing results confirmed the effectiveness of the proposed method.

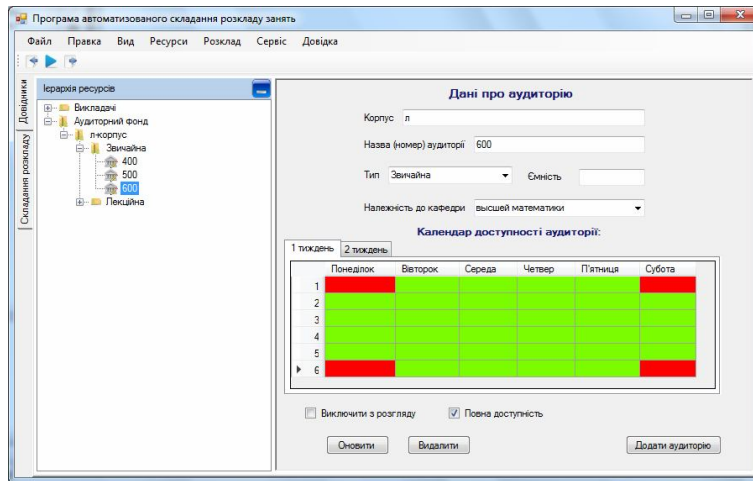


Fig. 10. Room data updating form

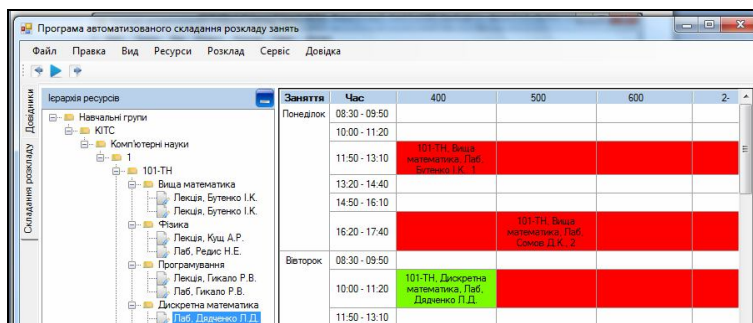


Fig. 11. Manual course timetabling

	A	B	C	D
1	День	Час	101-ТН	102-ТН
2	Понеділок	08:30 - 09:50		Дискретна математика, Лаб., Дядченко П.Д., 303п
3		10:00 - 11:20	Вища математика, Лекція, Бутенко І.К., 301п	Вища математика, Лекція, Бутенко І.К., 301п
4		11:50 - 13:10	Дискретна математика, Лаб., Дядченко П.Д., 303п	
5		13:20 - 14:40		
6		14:50 - 16:10		
7		16:20 - 17:40		
8		Вівторок	08:30 - 09:50	Дискретна математика, Лаб., Дядченко П.Д., 304п
9	10:00 - 11:20		Фізика, Лекція, Куш А.Р., 100п	Фізика, Лекція, Куш А.Р., 100п
10	11:50 - 13:10		Програмування, Лаб., Гикало Р.В., 101п	Вища математика, Лаб., Сомов Д.К.(2), 102к
11	13:20 - 14:40			
12	14:50 - 16:10			
13	16:20 - 17:40			
14	Середа	08:30 - 09:50		Програмування, Лаб., Гикало Р.В., 101п
15		10:00 - 11:20	Вища математика, Лекція, Бутенко І.К., 301п	Вища математика, Лекція, Бутенко І.К., 301п
16		11:50 - 13:10	Фізкультура	Фізкультура
17		13:20 - 14:40		
18		14:50 - 16:10		
19	16:20 - 17:40			
20	Четвер	08:30 - 09:50	Дискретна математика, Лаб., Дядченко П.Д., 304п	Фізика, Лаб., Редис Н.Е., 410ф
21		10:00 - 11:20	Вища математика, Лаб., Бутенко І.К.(1), 101к/Вища математика, Лаб., Сомов Д.К.(2), 102к	Дискретна математика, Лаб., Дядченко П.Д., 303п
22		11:50 - 13:10		
23		13:20 - 14:40		
24		14:50 - 16:10		
25	16:20 - 17:40			
26	П'ятниця	08:30 - 09:50	Фізика, Лаб., Редис Н.Е., 410ф	Дискретна математика, Лаб., Дядченко П.Д., 303п
27		10:00 - 11:20	Програмування, Лекція, Гикало Р.В., 100п	Програмування, Лекція, Гикало Р.В., 100п

Fig. 12. Results of automatic timetabling

## Conclusions

As a result of the work, a hybrid approach to solving of the automated timetabling problem in higher educational institution based on the ant colony optimization, the genetic algorithm, and the Nelder–Mead method has been developed. Use of this algorithm allows for reducing of algorithm running time and

increasing of global optimum finding probability. The developed hybrid method is the basis of the software for the university course timetabling. Use of this system at the university will facilitate and increase the efficiency of the dispatchers who are involved in scheduling, and the quality of the educational process by taking into account wish of the educational process participants.

## REFERENCES

1. Khasukhadzhiyev A.S., Sibikina I.V. Obobshchennyi algoritm sostavleniya raspisaniya v vuze s uchetom novykh trebovaniy federal'nykh gosudarstvennykh obrazovatel'nykh standartov // Vestnik Astrakhan. gos. tekhn. un-ta. Ser. upravleniye, vychisl. tekhn. inform., 2016, № 3. Pp. 78–86.
2. PATAT Conferences. URL: <https://patatconference.org>.
3. Dvoryankin A.M. Chalyshev V.S. Obzor metodov sostavleniya raspisaniya vuzov // Izv. VolgGTU. Seriya Aktual'nyye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh: mezhvuz. sb. nauch. st., 2011. Vyp. 11, № 9. Pp. 110–113.
4. Tomashevs'kyu V.M. Novikov YU.L., Kamins'ka P.A. Skladannya rozkladiv zanyat' u dystantsiynykh systemakh navchannya // Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskyy politekhnichnyy instytut". Ser.: Informatyka, upravlinnya ta obchyslyval'na tekhnika, 2010. Vyp. 52. Pp. 118–130.
5. Lagosha B.A., Petropavlovskaya A.V. Kompleks modeley i metodov optimizatsii raspisaniya zanyatiy v vuze // Ekonomika i matematicheskiye metody, 1993. № 4. Pp. 48–56.
6. Bania Kumar Rubul, Duarah, Pinkey. Exam Time Table Scheduling using Graph Coloring Approach // International Journal of Computer Sciences and Engineering, 2018. № 6. Pp. 84–93.
7. Bezginov A.N. Tregubov S.YU. Obzor sushchestvuyushchikh metodov sostavleniya raspisaniy // Informatsionnyye tekhnologii i programirovaniye. Mezhevuzovskiy sbornik statey, M., 2005. Vypusk 2 (14).
8. Leite Nuno, Melicio Fernando, Rosa Agostinho. A fast simulated annealing algorithm for the examination timetabling problem // Expert Systems with Applications, 2018. Vol. 122.
9. Astakhova I.F., Firas A.M. Sostavleniye raspisaniya uchebnykh zanyatiy na osnove geneticheskogo algoritma // Vestnik VGU, seriya: Sistemyy analiz i informatsionnyye tekhnologii, 2013. № 2. Pp. 93 – 99.
10. Zhukova M.YU., Al'-Gabri V.M. Avtomatizatsiya postroyeniya raspisaniya ekzamenov VUZa s ispol'zovaniyem geneticheskogo algoritma // Inzhenernyy vestnik Dona, 2017. №3.
11. Boyko O.M. Evolyutsiyna tekhnolohiya rozv'yazuvannya zadachi skladannya rozkladiv navchal'nykh zanyat' // Shtuchnyy intelekt, 2006. № 3. Pp. 341 – 348.
12. Mulyava I. YA. Systema formuvannya rozkladu navchal'noho zanyat' z vykorystanniam sub'yektyvnykh perevah // International scientific journal, 2016. № 7. Pp. 22–27.
13. Ustenko S.V., Bibko O.O. Vykorystannya metodu murashynoyi koloniyi dlya rozv'yazannya optymizatsiynykh zadach. Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy, vyp. 25, vyp. 3, Berezen', 2015. Pp. 351–359.
14. Thepphakorn T, Pongcharoen P, Hicks C. An ant colony based timetabling tool // International Journal of Production Economics, 2014, № 149(3). Pp. 131–144.
15. Yurchak I.YU., Moskovych T.R. Doslidzhennya henetychnykh alhorytmiv ta zastosuvannya yikh v avtomatyzovaniy systemi rozpodilu navantazhennya dlya vykladachiv i studentiv. URL: <http://com.lp.edu.ua/sntk/doc/ksm2018/moskovytch.pdf>.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.05.2020

## Гібридний підхід до розв'язання задачі автоматизованого складання розкладу вищого навчального закладу

О. М. Гайтан, О. С. Назаров

**Анотація.** У роботі описано гібридний підхід до розв'язання задачі автоматизованого складання розкладу вищого навчального закладу на основі методу мурашиних колоній, генетичного алгоритму та методу деформованого багатогранника. Метод мурашиної колонії є основою даного алгоритму, що формує початкову популяцію для генетичного алгоритму. Комбінація даного метода з генетичним алгоритмом та методом деформованого багатогранника спрямована на усунення таких недоліків даного метода як невизначеність часу збіжності алгоритму та сильна залежність результатів роботи методу від початкових параметрів пошуку, які зазвичай підбираються експериментально. Метод деформованого багатогранника використовується для знаходження параметрів методу мурашиних колоній. Використання генетичного алгоритму дозволяє зменшити час роботи алгоритму та збільшити ймовірність попадання в глобальний оптимум. Складання розкладу навчального процесу у вищому навчальному закладі (ВНЗ) є важливою складовою системи забезпечення навчального процесу, оскільки від якості розкладу залежить комфорт учасників навчального процесу та його якість і ефективність, отже, розроблення методів генерації комп'ютерного розкладу є актуальною темою. Предметом дослідження є адаптивні методи автоматичного складання розкладу ВНЗ. Мета роботи – розроблення гібридного підходу до розв'язання задачі автоматизованого складання розкладу вищого навчального закладу. Результати – розробка та дослідження гібридного методу та програмна реалізація системи складання розкладу навчального процесу в університеті з використанням розглянутих методів.

**Ключові слова:** багатокритеріальна оптимізація, метод мурашиних колоній, генетичний алгоритм, метод деформованого багатогранника, розклад, таймслот.

Г. А. Кучук<sup>1</sup>, А. А. Коваленко<sup>2</sup>, Н. В. Лукова-Чуйко<sup>3</sup>, І. Ю. Криволапов<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>3</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>4</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

## РОЗПІЗНАВАННЯ ДІЛЯНОК ВИРУБКИ ЛІСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

**Анотація.** Одним зі способів боротьби із незаконною вирубкою лісів є постійний моніторинг супутникових знімків деяких районів та розпізнавання на них потенційних вирубок. **Метою статті** є розроблення системи розпізнавання ділянок вирубок лісів на зображенні зі супутника за допомогою згорткових нейронних мереж з метою своєчасного інформування про незаконні подібні дії у заданому регіоні. **Результати дослідження.** Супутниками, з яких були отримані всі необхідні зображення, є Landsat-8 та Sentinel-2, що роблять знімки щодня з 16-денним та 10-денним циклами повторення відповідно. Розпізнавання здійснювалось за допомогою згорткової нейронної мережі, що навчалася на наборі даних великого обсягу. **Висновок.** Розроблений програмний продукт може виконувати такі функції: вибір координат; зберігання координат для подальшого використання; вибір проміжку часу; завантаження супутникових зображень за вибраний проміжок часу; розпізнавання зображень. Розроблена система є десктопним застосунком. Модульність основних функцій системи дозволить у майбутньому за невеликий час модифікувати їх для використання у повністю автоматизованих системах, не потребуючих управління оператором.

**Ключові слова:** згорткові нейронні мережі, розпізнавання, класифікація, вирубка лісу.

### Вступ

**Постановка завдання.** На сьогодні весь світ починає все більше піклуватися про навколишнє середовище. Одним із негативних факторів є вирубка лісів, особливо незаконна. Разом з цим стає все більше застосунків, призначених для моніторингу стану лісів та оповіщення про вирубки. Один з таких застосунків у жовтні 2019 року з'явився і в Україні. Це онлайн-карта, на якій відображаються дані о вирубках. Також є схожий проект, що називається "Global Forest Watch", що охоплює усю планету.

**Аналіз літератури.** Вважаючи на великі обсяги інформації, що повинна оброблятися при визначенні ділянок вирубки лісів, вірний вибір програмних засобів обробки зображень є дуже суттєвим [1-3]. Найбільш сприятливі результати надають штучні нейронні мережі (ШНМ). Обробці зображень з використанням ШНМ присвячено багато робіт [4-8]. Для багатьох видів зображень на сьогодні застосовуються згорткові нейронні мережі (англ. CNN). CNN є найпростішим вибором при розпізнаванні зображень. На сьогодні CNN поза конкуренцією з точки зору точності розпізнавання реальних зображень. Вони також успішно застосовуються у рекомендаційних системах, обробці мови, тощо. Основною перевагою CNN у порівнянні з попередниками є те, що вони автоматично виявляють ознаки без будь-якого людського втручання. CNN також ефективні при проведенні обчислень. Моделі CNN можуть працювати на будь-якому пристрої, що робить їх універсальними. Принципи формування, навчання та використання CNN наведені в [9-14].

**Метою даної статті** є розроблення системи розпізнавання ділянок вирубок лісів на зображенні зі супутника за допомогою згорткових нейронних мереж з метою своєчасного інформування про незаконні подібні дії у заданому регіоні.

### Постановка завдання

Для розроблення системи розпізнавання вирубок лісів за допомогою згорткових нейронних мереж необхідно реалізувати такий функціонал:

- вибір координат;
- зберігання координат для подальшого використання;
- вибір проміжку часу;
- завантаження супутникових зображень за вибраний проміжок часу;
- розпізнавання зображень.

При цьому необхідно вирішити такі допоміжні завдання:

- пошук набору даних для навчання;
- пошук сервісу для зображень зі супутника;
- визначення вирубки на зображенні з високою хмарністю.

Крім того планується додати такий допоміжний функціонал:

- відзначення вирубки на зображенні;
- порівняння зображень між собою (без використання нейронної мережі);
- фільтрація зображень по міткам;
- автоматизація перевірки та розпізнавання ділянки водночас із оповіщенням.

### Результати досліджень

В основі моделі, яка буде використана для навчання, лягла модель VGG16 (рис. 1).

Ця модель була навчена на 14 мільйонах зображень з 22 тисяч різних категорій. Одним з її недоліків є те, що навчання проходить у кілька разів довше за інші моделі, такі як ResNet50, або InceptionV3. Причиною цього є те, що ця модель має приблизно 140 мільйонів параметрів, у порівнянні з 25 мільйонами у ResNet50 та 24 мільйонами у InceptionV3.

Але VGG16 перевірена часом, та досі використовується у багатьох задачах навіть сьогодні, це приймаючи до уваги те, що є інші моделі, які показують кращі часові результати на наборі даних ImageNet. Крім того, час навчання не є суттєвим та

вибір моделі для навчання не потрібен бути остаточною, бо замінити модель можна дуже швидко (не беручи до уваги той час, що буде потрібен на навчання з нуля), так як усі вони мають схожі інтерфейси у Keras – API для нейронних мереж.

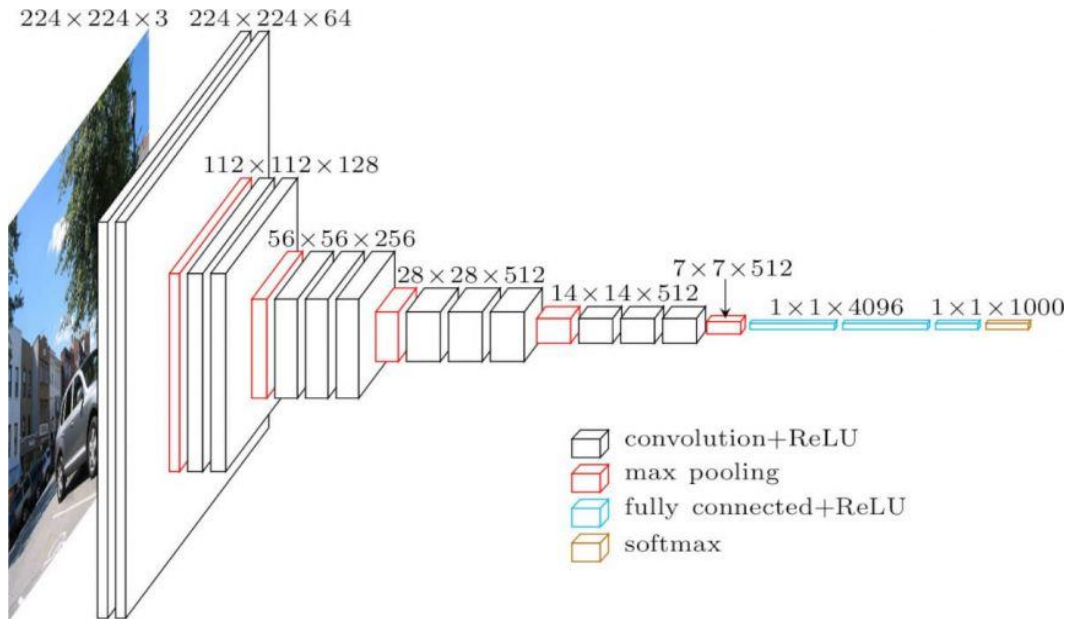


Рис. 1. Архітектура VGG16

В процесі навчання розмір вхідного зображення був замінений на  $128 \times 128 \times 3$ , щоб прискорити навчання, при цьому не втрачаючи необхідних деталей. Архітектура, з якою було далі проходити навчання, показана на рис. 2.

У якості набору даних для задачі розпізнавання вирубки дерев був обраний набір зі змагання "Planet: Understanding the Amazon from Space" на kaggle.

Усі дані були зібрані між 1 січнем 2016 року та 1 лютом 2017 року. Дані – це знімки з космосу розміром  $256 \times 256$  кожний (рис. 3).

Незважаючи на те, що усі знімки були зроблені у Бразилії, вони добре підходять для розпізнавання вирубок і в інших місцях. Можливо лише модель буде іноді запевняти, що на зображенні є вода, коли її там немає, це через те, що такої річки як Амазонка, що тягнеться через увесь ліс, немає майже ніде. Тож модель у деякому сенсі пристосовується до зображень з цього набору.

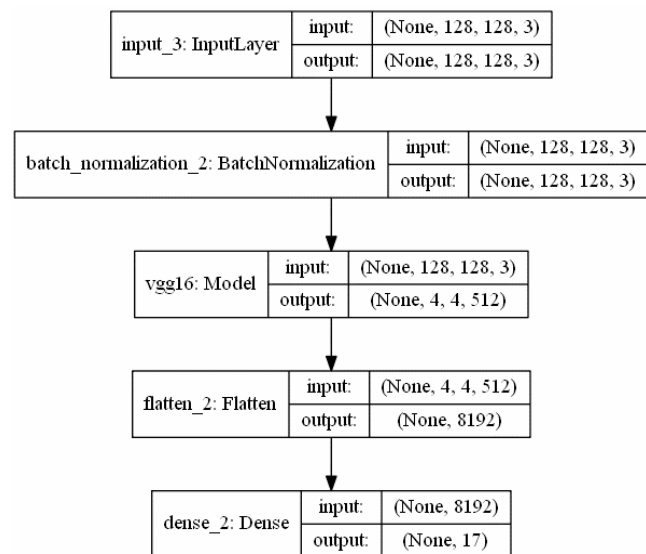


Рис. 2. Архітектура нейронної мережі

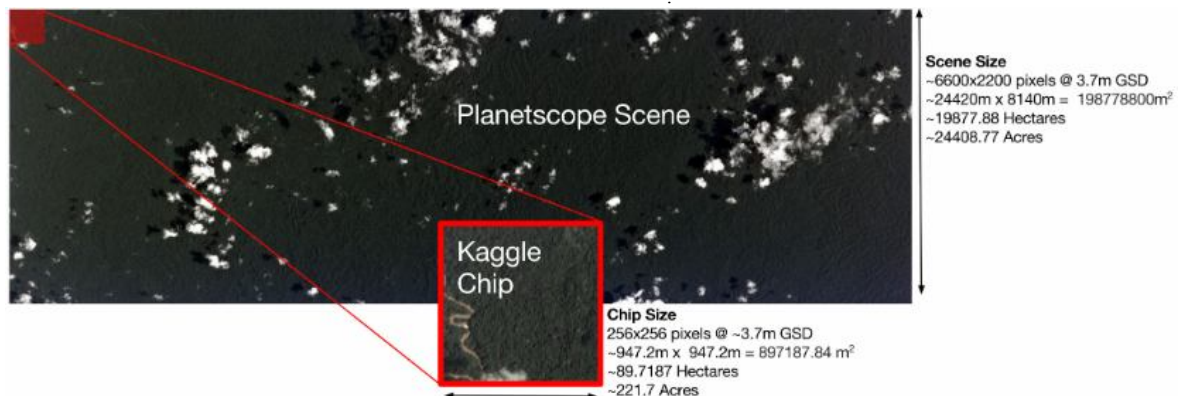


Рис. 3. Знімки з космосу



Усього було зібрано 40479 зображень для навчання та перевірки, та 61191 зображень для тестування готової моделі.

Кожне зображення має 1 або декілька міток (рис. 4):

- clear (нема хмар);
- partly cloudy (частково хмарно);
- cloudy (не видно нічого крім хмар);
- haze (туман);
- primary (ліс);
- water (вода);
- habitation (поселення, цивілізація);
- agriculture (сільське господарство);
- road (дорога);
- cultivation (невеличке сільське господарство);
- bare ground (гола земля);
- slash and burn (обгоріла територія);
- selective logging (вибіркова лісорозробка);
- blooming (цвітіння);
- conventional mining (видобуток корисних копалин);
- "artisanal" mining (нелегальний видобуток корисних копалин);
- blow down (масовий нахил дерев від сильного вітру).

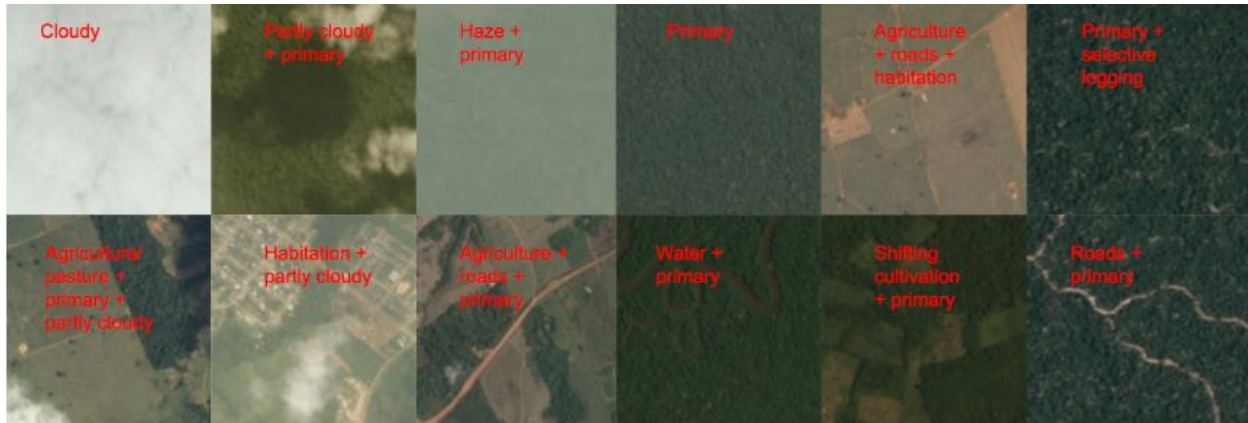


Рис. 4. Приклади помічених зображень

Мітка, що цікавить найбільше – "artisanal" mining. Хоча ця мітка означає нелегальний видобуток корисних копалин, вона також добре відображає вирубку лісу, бо у місцях видобутку частіше за все є також і ліс, який необхідно перед цим вирубати. Окрім того, навіть якщо цілком є сама вирубка лісу, зображення зі супутника виглядає дуже схожим образом. Отже, далі у ця мітка буде означати вирубку лісу. Задача додатка буде завантажити усі зображення за вибраний період та пропустити їх через нейронну мережу, а після цього знайти усі зображення саме з цією міткою та "помітити" їх. Приклад такого зображення можна побачити на рис. 5.

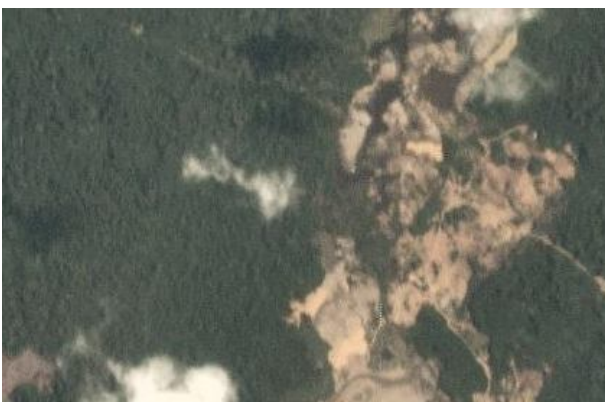


Рис. 5. Нелегальна вирубка лісу в Бразилії

З 40479 зображень для навчання буде використано 80%, а 20% залишиться для перевірки, під час якої модель буде також налаштована.

## Програмна реалізація

Інтерфейс програми (рис. 6) має такі елементи:

- 1) назва полігону;
- 2) розмір сторони у метрах (приблизно, залежить від форми землі);
- 3) довгота;
- 4) широта;
- 5) початкова дата;
- 6) кінцева дата;
- 7) створити полігон;
- 8) отримати усі доступні зображення у вибраному полігоні за вибраний період;
- 9) доступні полігони;
- 10) отримані помічені зображення.

Для завантаження зображень зі супутника був використаний сервіс AgroAPI. Він дозволяє отримувати зображення у заданій області за вказаний проміжок часу, а також створювати так звані "полігони" у заданих координатах, розміром від 1 до 2500 га. Потім по цих полігонах можна отримувати зображення, які були зроблені зі супутників Landsat-8 або Sentinel-2.

Для створення полігону необхідно обрати координати та розмір квадрату (не зовсім квадрату, але близько). Це можна зробити наприклад за допомогою Google Maps (рис. 7, 8). Важливо відмітити, що отримані координати можуть трохи відрізнятись ( $< 0,00001$ ).

Для отримання зображень по вибраному полігону необхідно ввести дати (з та до), обрати полігон, та натиснути "Get Images" (рис. 9).

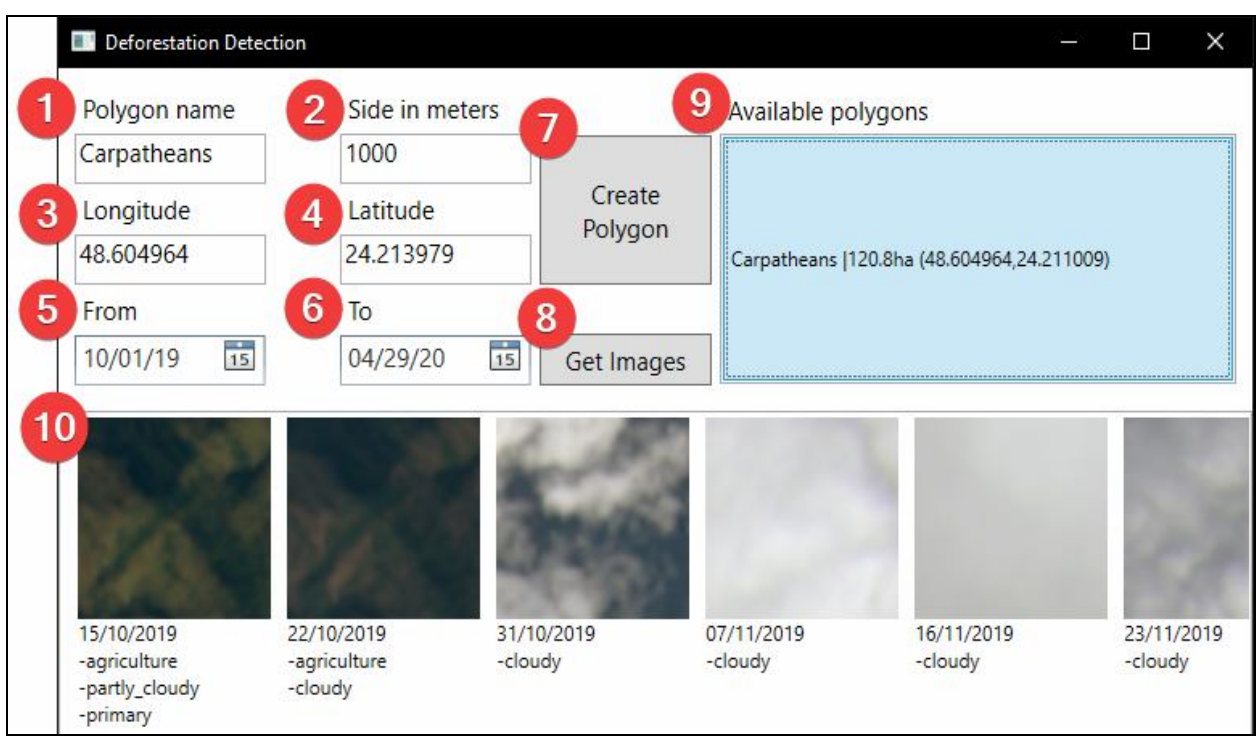


Рис. 6. Інтерфейс програми

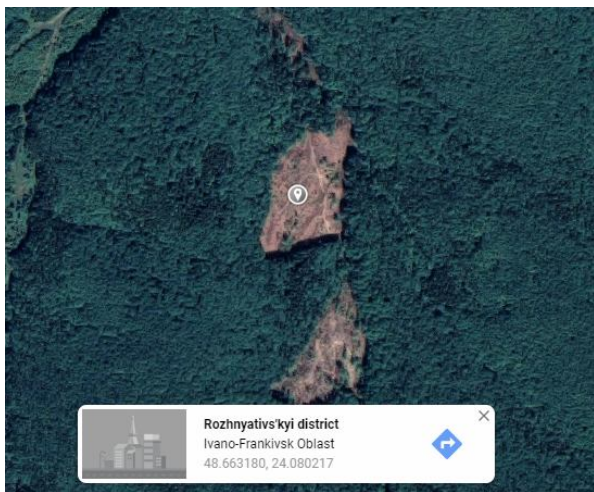


Рис. 7. Вибір координат на Google Maps

чі вирубки. У випадку нижче важко помітити вирубку, тож це швидше за все хибне розпізнавання (рис. 10).

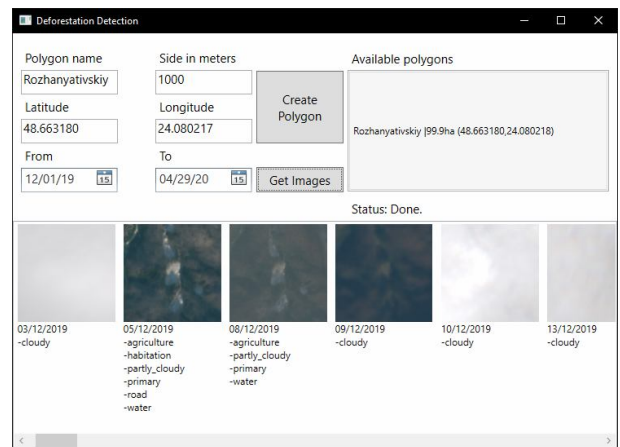


Рис. 9. Отримання зображень по полігону

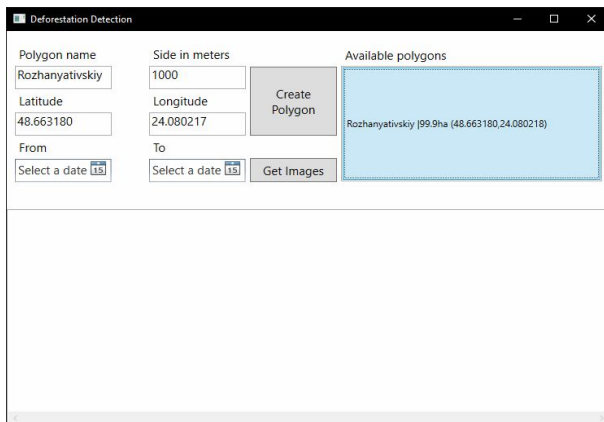


Рис. 8. Створення полігону

Усі зображення, що мають мітку "artisanal mining", будуть помічені червоним, як потенційно маю-

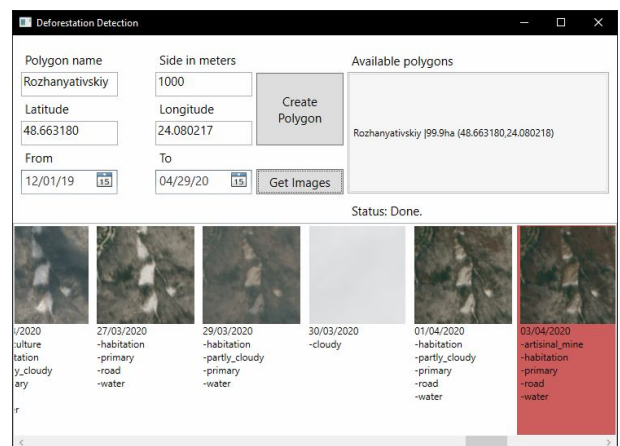


Рис. 10. Потенційна вирубка



## Висновки

Актуальною розробку роблять такі фактори: неконтрольоване зменшення лісів з кожним роком, потреба в автоматизації процесу виявлення вирубок; управління лісами має безпосередній вплив на якість води, від якої залежать життя і здоров'я як сільського, так і міського населення; витікаючи з першого пункту, автоматизація цього процесу забезпечить уповільнення вирубок лісу, тим самим даючи час на впровадження інших заходів. Дана робота відповідає вимогам і виконана в повній мірі, виходячи з поставлених пунктів, розроблений програмний продукт може виконувати такі функції:

вибір координат; зберігання координат для подальшого використання; вибір проміжку часу; завантаження супутникових зображень за вибраний проміжок часу; розпізнавання зображень. Розроблена система є десктопним застосунком, з яким працює оператор та відповідно до його дій дозволяє отримувати зображення для обраної області за вибраний період. Модульність основних функцій цього засобу дозволяють у майбутньому за невеликий час модифікувати їх для використання у повністю автоматизованих системах, не потребуючих керівництва оператора.

**Напрямок подальших досліджень:** проведення порівняльного аналізу різних систем та методів навчання розробленої нейронної мережі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiara, O. (2018), "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
2. Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.
3. 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.
4. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
5. Тереник Д., Кучук Г.А. Порівняння SQL і NOSQL баз даних на прикладі проектування аффілейт репорт систем. *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 1(93). С. 83–89.
6. Бульба С.С., Кучук Г.А., Давидов В.В. Метод розподілу ресурсів між композитними за стосунками. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, 2018. Вип. 4(50). С. 99-104. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.4.099>
7. Кучук Г.А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка / Г.А. Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 5 (45). – С. 74-84.
8. 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>
9. Простими словами про складні: що таке нейронні мережі? Режим доступу: <https://phoneinfo8.info/prostimi-slovami-pro-skladni-sho-take-neironni-mereji/>
10. Згорткові нейронні мережі (англ.). Режим доступу: <https://towardsdatascience.com/applied-deep-learning-part-4-convolutional-neural-networks-584bc134c1e2>
11. Yaloveha, V., Hlavcheva, D., Podorozhniak, A. and Kuchuk, H. (2019), "Fire hazard research of forest areas based on the use of convolutional and capsule neural networks", 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), IEEE, pp. 828-832, DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879867>
12. Kuchuk, H., Podorozhniak, A., Hlavcheva, D. and Yaloveha, V. (2020), "Application of Deep Learning in the Processing of the Aerospace System's Multispectral Images", Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries, IGI Global, pp. 134-147, DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1415-3.ch005>
13. Кучук Г.А., Саатсазов Б.Г. Распознавание человеческих эмоций с использованием нейросетевых технологий. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : ПНТУ, 2017. Вип. 4(44). С. 64-69.
14. 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>

Received (Надійшла) 25.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

## Recognition of deforestation areas using convolved neural networks

H. Kuchuk, I. Krivolapov

**Abstract.** One way to combat illegal deforestation is to constantly monitor satellite images of some areas and identify potential deforestation. **The purpose of the article** is to develop a system for recognizing areas of deforestation on a satellite image using convolutional neural networks in order to timely inform about illegal similar actions in a given region. **Research results.** The satellites from which all the necessary images were obtained are Landsat-8 and Sentinel-2, which take pictures daily with 16-day and 10-day repeat cycles, respectively. Recognition was performed using a convolutional neural network, which was trained on a large data set. **Conclusions.** The developed software product can perform the following functions: selection of coordinates; storage of coordinates for further use; choice of time interval; download satellite images for the selected period of time; image recognition. The developed system is a desktop application. The modularity of the main functions of the system will allow in the future in a short time to modify them for use in fully automated systems that do not require operator control.

**Keywords:** convolutional neural networks, recognition, classification, deforestation.

Я. В. Литвиненко<sup>1</sup>, С. А. Лупенко<sup>1</sup>, П. А. Ониськів<sup>1</sup>, В. М. Триснюк<sup>2</sup>, А. М. Зозуля<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

<sup>2</sup> Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

## МЕТОДИ СТАТИСТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ РИТМОКАРДІОСИГНАЛУ ІЗ ПІДВИЩЕНОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ НА ОСНОВІ ЙОГО МОДЕЛІ У ВИГЛЯДІ ВЕКТОРА СТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ

**Анотація.** Робота присвячена методам статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю на основі його моделі у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових процесів. Було підтверджено гіпотезу про нормальність закону розподілу компонент ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю. В реальних комп'ютерних системах аналізу серцевого ритму завжди реєструється скінчена кількість циклів електрокардіосигналу, тому цей факт необхідно врахувати і при статистичному оцінюванні ймовірнісних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю. А саме, статистичне оцінювання ймовірнісних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю полягає в отриманні реалізації статистичних оцінок, які можуть бути прийняті за наближення до відповідних ймовірнісних характеристик досліджуваного ритмокардіосигналу. Для врахування часової динаміки ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю необхідно використовувати математичний апарат теорії випадкових процесів, а саме, розглядати його як вектор дискретних випадкових процесів. Обґрунтовано вектор діагностичних ознак в системах аналізу серцевого ритму за ритмокардіосигналами із підвищеною роздільною здатністю.

**Ключові слова:** методи статистичної оцінки, ймовірнісні характеристики, вектор стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, електрокардіосигнал, ритм-кардіосигнал, серцебиття.

### Вступ

Системи автоматизованого аналізу ритму серця дають змогу оцінити як стан серцево-судинної системи, так і стан адаптивних можливостей організму людини вцілому. Більшість сучасних систем аналізу серцевого ритму ґрунтуються на використанні стохастичних математичних моделей ритмокардіосигналу та методів його статистичного аналізу за ритмокардіограмою, яка є упорядкованою сукупністю тривалостей R-R-інтервалів в зареєстрованому електрокардіосигналі [1-8]. Однак, такий підхід не дає змоги виявити тонкі, більш детальні особливості серцевого ритму, оскільки R-R-інтервали відображають лише зміну у часі тривалостей серцевих циклів, а не всю сукупність часових інтервалів між однофазними значеннями електрокардіосигналу для всіх його фаз, що не дає змоги описати ритм серця у повному обсязі. У роботах [9-12], з метою більш інформативнішого опису серцевого ритму, обґрунтовано новий підхід до його аналізу на основі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю. Класична ритмокардіограма є вкладеною у ритмокардіограму із підвищеною роздільною здатністю, що і є підставою для підвищення рівня інформативності аналізу серцевого ритму в сучасних комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серця людини на основі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю. У роботах [9-12] обґрунтовано застосування вектора випадкових величин як математичної моделі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю. Однак ця модель є відносно бідною математичною моделлю ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, оскільки не дає змогу досліджувати її часову динаміку. Для врахування часової динаміки ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю необхідно використовувати математичний

апарат теорії випадкових процесів, а саме, розглядати його як вектор дискретних випадкових процесів.

**Постановка завдання.** У даній роботі розробимо методи статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю на основі його моделі у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей.

### Результати дослідження

Однією із найпростіших стохастичних моделей, яка враховує динаміку змін ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, є вектор

$$\Xi_L(\omega', m) = \left\{ T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m \in \mathbf{Z} \right\}$$

стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей. У цьому векторі індекс  $m$  позначає номер циклу електрокардіосигналу, а індекс  $l$  – номер відліку електрокардіосигналу в рамках його  $m$ -го циклу. Кількість відліків  $L$  на цикл електрокардіосигналу визначає роздільну здатність ритмокардіосигналу, та задає кількість фаз на циклі електрокардіосигналу, які можуть бути виділені методами сегментації та детектування при вирішенні завдання автоматичного формування ритмокардіосигналу із електрокардіосигналу.

Визначальною властивістю вектора  $\Xi_L(\omega', m)$  стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей є інваріантність його сімейства функцій розподілу до часових зсувів на довільне ціле число  $k \in \mathbf{Z}$ . А саме, для будь-якої функції розподілу  $F_{pT_1 \dots T_p}(x_1, \dots, x_p, m_1, \dots, m_p)$  порядку  $p$  ( $p \in \mathbf{N}$ ) із сімейства функцій розподілу вектора  $\Xi_L(\omega', m)$  стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей має місце така рівність:

$$F_{p_{T_1 \dots T_p}}(x_1, \dots, x_p, m_1, \dots, m_p) = F_{p_{T_1 \dots T_p}}(x_1, \dots, x_p, m_1 + k, \dots, m_p + k), \quad x_1, \dots, x_p \in \mathbf{R}, m_1, \dots, m_p \in \mathbf{Z}, l_1, \dots, l_p \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, k \in \mathbf{Z}. \quad (1)$$

Подамо формули, які репрезентують збіжність у середньоквадратичному сенсі відповідних статистичних оцінок до оцінюваних імовірнісних характеристик вектора

$$\Xi_L(\omega', m) = \left\{ T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m \in \mathbf{Z} \right\}$$

стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей.

Оцінка, що збігається у середньоквадратичному сенсі до функції розподілу

$$F_{p_{T_1 \dots T_p}}(x_1, \dots, x_p, m_1, \dots, m_p)$$

порядку  $p$  ( $p \in \mathbf{N}$ ) вектора  $\Xi_L(\omega', m)$  стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей:

$$F_{p_{T_1 \dots T_p}}(x_1, \dots, x_p, m_1, \dots, m_p) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K \prod_{j=1}^p H(x_j - T_{l_j}(\omega', m_j + k)), \quad (2)$$

$$x_1, \dots, x_p \in \mathbf{R}, m_1, \dots, m_p \in \mathbf{Z}, l_1, \dots, l_p \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, k \in \mathbf{Z}.$$

$$\text{Функція } H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \text{ є функцією Хевісайда, яка є індикатором невід'ємного числа.}$$

Зокрема, якщо у формулі (2)  $p = 1$ , тобто  $l_1 = l_2 = \dots = l_p = l$ , то матимемо одновимірну  $F_{l_{T_1}}(x) = F_{l_{T_1}}(x, m)$  автофункцію розподілу стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , для якої із формули (2) слідує збіжність у середньоквадратичному сенсі:

$$F_{l_{T_1}}(x) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K H(x - T_l(\omega', k)), \quad (3)$$

$$x \in \mathbf{R}, l \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, k \in \mathbf{Z}.$$

Оцінка, що збігається у середньоквадратичному сенсі до змішаної початкової моментної функції порядку  $s = \sum_{j=1}^p s_j$ :

$$c_{s_{T_1 \dots T_p}}(m_1, \dots, m_p) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K T_{l_1}^{s_1}(\omega', m_1 + k) \dots \cdot T_{l_p}^{s_p}(\omega', m_p + k), \quad (4)$$

$$m_1, \dots, m_p \in \mathbf{Z}, l_1, \dots, l_p \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, k \in \mathbf{Z}.$$

Якщо  $s = 2$  та  $p = 2$ , то із формули (4) слідує така збіжність у середньоквадратичному сенсі для коваріаційної функції  $c_{s_{T_1 T_2}}(m_1, m_2)$  двох стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей  $T_{l_1}(\omega', m)$  та  $T_{l_2}(\omega', m)$ , які описують

часові відстані між однофазними відліками електрокардіосигналу для  $l_1$ -ї та  $l_2$ -ї його фаз, а саме:

$$c_{2_{T_1 T_2}}(m_1, m_2) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \times \sum_{k=-K}^K T_{l_1}(\omega', m_1 + k) \cdot T_{l_2}(\omega', m_2 + k), \quad (5)$$

$$m_1, m_2 \in \mathbf{Z}, l_1, l_2 \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, k \in \mathbf{Z}.$$

Якщо в формулі (4)  $p = 1$ , тобто  $l_1 = l_2 = \dots = l_p = l$ , то матимемо збіжність оцінки у середньоквадратичному сенсі до одновимірної початкової моментної функції  $c_{s_{T_l}}(m)$   $s$ -го порядку, яка для стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$  є константою  $c_{s_{T_l}} = c_{s_{T_l}}(m)$  (початковий момент  $s$ -го порядку), а саме:

$$c_{s_{T_l}} = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K T_l^s(\omega', k), \quad l \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (6, a)$$

Якщо в формулі (6, a)  $s = 1$ , то матимемо збіжність оцінки у середньоквадратичному сенсі до початкового моменту першого порядку  $c_{1_{T_l}} = c_{1_{T_l}}(m)$  (математичного сподівання) стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , а саме:

$$c_{1_{T_l}} = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K T_l(\omega', k), \quad l \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (6, b)$$

Оцінка, що збігається у середньоквадратичному сенсі до змішаної початкової центральної функції порядку  $s = \sum_{j=1}^p s_j$ :

$$r_{s_{T_1 \dots T_p}}(m_1, \dots, m_p) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K \left( T_{l_1}(\omega', m_1 + k) - c_{1_{T_{l_1}}} \right)^{s_1} \dots \cdot \left( T_{l_p}(\omega', m_p + k) - c_{1_{T_{l_p}}} \right)^{s_p}, \quad (7)$$

$$m_1, \dots, m_p \in \mathbf{Z}, l_1, \dots, l_p \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, k \in \mathbf{Z}.$$

Якщо  $s = 2$  та  $p = 2$ , то із формули (7) слідує така збіжність у середньоквадратичному сенсі для кореляційної функції  $r_{s_{T_1 T_2}}(m_1, m_2)$  двох стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей  $T_{l_1}(\omega', m)$  та  $T_{l_2}(\omega', m)$ , які описують часові відстані між однофазними відліками електрокардіосигналу для  $l_1$ -ої та  $l_2$ -ої його фаз, а саме:

$$r_{2_{T_1 T_2}}(m_1, m_2) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \times \sum_{k=-K}^K \left( T_{l_1}(\omega', m_1 + k) - c_{1_{T_{l_1}}} \right) \cdot \left( T_{l_2}(\omega', m_2 + k) - c_{1_{T_{l_2}}} \right), \quad (8)$$

$$m_1, m_2 \in \mathbf{Z}, l_1, l_2 \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, k \in \mathbf{Z}.$$

Якщо в формулі (8)  $s=2$  та  $p=1$ , тобто  $l_1=l_2=\dots=l_p=l$ , то матимемо збіжність оцінки у середньоквадратичному сенсі до дисперсії  $r_{2T_l}$  стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , а саме:

$$r_{2T_l} = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K \left( T_l(\omega', k) - c_{T_l} \right)^2, l \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (9)$$

Наведені вище формули відображають збіжність у середньоквадратичному сенсі статистичних оцінок до відповідних ймовірносних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, а, отже, дані статистичні оцінки є слушними.

Оскільки в реальних комп'ютерних системах аналізу серцевого ритму завжди реєструється скінчена кількість циклів електрокардіосигналу, то цей факт необхідно врахувати і при статистичному оцінюванні ймовірносних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю. А саме, статистичне оцінювання ймовірносних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю полягає в отриманні реалізацій статистичних оцінок, які можуть бути прийняті за наближення до відповідних ймовірносних характеристик досліджуваного ритмокардіосигналу.

Запишемо вирази для обчислення реалізацій відповідних статистичних оцінок ймовірносних характеристик вектора

$$\Xi_L(\omega', m) = \left\{ T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m \in \mathbf{Z} \right\}$$

стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей у випадку, коли задана деяка довга його реалізація

$$\Xi_{L\omega'}(m) = \left\{ T_{l\omega'}(m), l = \overline{1, L}, m = \overline{1, M} \right\},$$

де  $M$  – кількість зареєстрованих повних циклів електрокардіосигналу із якого сформовано ритмокардіосигнал із підвищеною роздільною здатністю.

Вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки функції розподілу

$$F_{pT_{l_1} \dots T_{l_p}}(x_1, \dots, x_p, m_1, \dots, m_p)$$

порядку  $p$  ( $p \in \mathbf{N}$ ) вектора  $\Xi_L(\omega', m)$  стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей має вигляд:

$$\begin{aligned} & \hat{F}_{pT_{l_1} \dots T_{l_p}}(x_1, \dots, x_p, m_1, \dots, m_p) = \\ & = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} \prod_{j=1}^p H(x_j - T_{l_j\omega'}(m_j + k)), \quad (10) \end{aligned}$$

$$x_1, \dots, x_p \in \mathbf{R}, m_1, \dots, m_p \in \left\{ \overline{1, M_1} \right\}, l_1, \dots, l_p \in \left\{ \overline{1, L} \right\}.$$

де  $M_1$  ( $M_1 \ll M$ ) – максимальне значення аргументів  $m_1, \dots, m_p$ , що вибирається у залежності від кількості усереднень в реалізації статистики, щоб забезпечити необхідний рівень точності та достовірності статистичного оцінювання.

Зокрема, якщо у формулі (10)  $p=1$ , тобто  $l_1=l_2=\dots=l_p=l$ , то матимемо вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки  $\hat{F}_{T_l}(x)$  одновимірної автофункції розподілу  $F_{T_l}(x)$  стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , а саме:

$$\begin{aligned} \hat{F}_{T_l}(x) &= \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} H(x - T_{l\omega'}(k)), \quad (11) \\ &, x \in \mathbf{R}, l \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \end{aligned}$$

Вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки змішаної початкової моментної функції порядку  $s = \sum_{j=1}^p s_j$  матиме вигляд:

$$\begin{aligned} & \hat{c}_{sT_{l_1} \dots T_{l_p}}(m_1, \dots, m_p) = \\ & = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} T_{l_1\omega'}^{s_1}(m_1 + k) \dots T_{l_p\omega'}^{s_p}(m_p + k), \quad (12) \end{aligned}$$

$$m_1, \dots, m_p \in \left\{ \overline{1, M_1} \right\}, l_1, \dots, l_p \in \left\{ \overline{1, L} \right\}.$$

Якщо  $s=2$  та  $p=2$ , то із формули (12) слідує вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки  $\hat{c}_{sT_{l_1}T_{l_2}}(m_1, m_2)$  коваріаційної функції  $c_{sT_{l_1}T_{l_2}}(m_1, m_2)$  двох стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей  $T_{l_1}(\omega', m)$  та  $T_{l_2}(\omega', m)$ , які описують часові відстані між однофазними відліками електрокардіосигналу для  $l_1$ -ої та  $l_2$ -ої його фаз, а саме:

$$\begin{aligned} & \hat{c}_{2T_{l_1}T_{l_2}}(m_1, m_2) = \\ & = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} T_{l_1\omega'}(m_1 + k) \cdot T_{l_2\omega'}(m_2 + k), \quad (13) \end{aligned}$$

$$m_1, m_2 \in \left\{ \overline{1, M_1} \right\}, l_1, l_2 \in \left\{ \overline{1, L} \right\}.$$

Якщо в формулі (12)  $p=1$ , тобто  $l_1=l_2=\dots=l_p=l$ , то отримаємо вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки  $\hat{c}_{sT_l}$  початкового моменту  $S$ -го порядку  $c_{sT_l}$  стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , а саме:

$$\hat{c}_{sT_l} = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} T_{l\omega'}^s(k), l \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (14)$$

Якщо в формулі (14)  $s = 1$ , то отримаємо вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки  $\hat{C}_{1T_l}$  початкового моменту першого порядку  $C_{1T_l}$  (математичного сподівання) стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , а саме:

$$\hat{c}_{1T_l} = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} T_{l\omega'}(k), l \in \{\overline{1, L}\}. \quad (15)$$

Вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки змішаної початкової центральної функції порядку  $s = \sum_{j=1}^p s_j$  матиме такий вигляд:

$$\hat{r}_{s_{T_{l_1} \dots T_{l_p}}}(m_1, \dots, m_p) = \frac{1}{M - M_1 + 1} \times \sum_{k=0}^{M-M_1+1} (T_{l_1\omega'}(m_1+k) - \hat{c}_{1T_{l_1}})^{s_1} \dots (T_{l_p\omega'}(m_p+k) - \hat{c}_{1T_{l_p}})^{s_p}, \quad (16)$$

$$m_1, \dots, m_p \in \{\overline{1, M_1}\}, l_1, \dots, l_p \in \{\overline{1, L}\}.$$

Якщо  $s = 2$  та  $p = 2$ , то із формули (16) слідує вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки кореляційної функції  $r_{s_{T_{l_1} T_{l_2}}}(m_1, m_2)$  двох стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей  $T_{l_1}(\omega', m)$  та  $T_{l_2}(\omega', m)$ , які описують часові відстані між однофазними відліками електрокардіосигналу для  $l_1$ -ої та  $l_2$ -ої його фаз, а саме:

$$\hat{r}_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}}(m_1, m_2) = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} (T_{l_1\omega'}(m_1+k) - \hat{c}_{1T_{l_1}}) \cdot (T_{l_2\omega'}(m_2+k) - \hat{c}_{1T_{l_2}}), \quad (17)$$

$$m_1, m_2 \in \{\overline{1, M_1}\}, l_1, l_2 \in \{\overline{1, L}\}.$$

Оскільки для стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей кореляційні функції є функціями лише від одного цілочисельного аргументу  $u$ , який дорівнює  $u = m_1 - m_2$ , то і їх статистичні оцінки також залежать лише від одного аргументу  $u$ . У цьому разі, якщо припустити ергодичність стаціонарних компонент вектора  $\Xi_L(\omega', m)$ , то формула (17) набуде такого вигляду:

$$\hat{r}_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}}(u) = \hat{r}_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}}(m_1 - m_2) = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} (T_{l_1\omega'}(k) - \hat{c}_{1T_{l_1}}) \cdot (T_{l_2\omega'}(k+u) - \hat{c}_{1T_{l_2}}), \quad (18)$$

$$u = \overline{0, M_1 - 1}, m_1, m_2 \in \{\overline{1, M_1}\}, l_1, l_2 \in \{\overline{1, L}\}.$$

Якщо в формулі (18)  $u = 0$ , а  $l_1 = l_2 = l$ , то матимемо вираз для обчислення реалізації оцінки дисперсії  $r_{2T_l}$  стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , а саме:

$$\hat{r}_{2T_l} = \frac{1}{M - 1} \sum_{k=1}^M (T_l(\omega', k) - c_{1T_l})^2, l \in \{\overline{1, L}\}. \quad (19)$$

### Перевірка гіпотези про нормальність компонент вектора

Найбільш повну інформацію про ймовірнісні характеристики ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю містить сімейство функцій розподілу

$$\left\{ F_{p_{T_{l_1} \dots T_{l_p}}}(x_1, \dots, x_p, m_1, \dots, m_p), p \in \mathbf{N}, l_1, \dots, l_p \in \{\overline{1, L}\} \right\}$$

вектора  $\Xi_L(\omega', m)$  стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, а всі решта ймовірнісні характеристики (змішані, центральні, початкові моментні функції різних порядків) є похідними від цього сімейства. Однак, зважаючи на високу обчислювальну складність методів статистичного оцінювання багатовимірних функцій розподілу вектора  $\Xi_L(\omega', m)$ , необхідно дослідити ритмокардіосигнали із підвищеною роздільною здатністю на предмет обґрунтування їх типів розподілу, зокрема, перевірити статистичну гіпотезу про нормальність (гаусовість) стаціонарних компонент вектора, що у випадку її підтвердження, дасть змогу застосувати модель досліджуваної ритмокардіограми у рамках спектрально-кореляційної теорії, а саме замість громіздкого, обчислювально складного оцінювання функцій розподілу, застосовувати обчислювально простіші процедури оцінювання спектрально-кореляційних характеристик ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю.

Перевіримо гіпотезу про нормальність закону розподілу компонент вектора  $\Xi_L(\omega', m)$ . Для цього застосуємо критерій згоди Пірсона ( $\chi^2$ -тест), що дає змогу встановити узгодженість (чи неузгодженість) емпіричного та теоретичного розподілів компонент вектора  $\Xi_L(\omega', m)$ . Емпіричний розподіл компонент вектора

$$\Xi_L(\omega', m) = \left\{ T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m = \overline{1, M} \right\},$$

оцінюється шляхом побудови гістограми. А саме, інтервал у який попадають усі значення реалізації  $T_{l\omega'}(m)$   $l$ -ої компоненти  $T_l(\omega', m)$  розбивається на  $I$  підінтервалів

$$\left\{ (S_i^l, S_{i+1}^l), i = \overline{1, I} \right\}$$

з тривалостями

$$\left\{ \Delta_i^l = S_{i+1}^l - S_i^l, i = \overline{1, I} \right\}$$

та для кожного інтервалу  $S_i^l$  обчислюється число  $h_i^l$  (емпірична частота), яке дорівнює відношенню кількості значень реалізації  $T_{l\omega'}(m)$   $l$ -ої компоненти  $T_l(\omega', m)$ , що попали в інтервал  $\Delta_i^l$ , до їх загальної кількості  $M$ , а саме:

$$h_i^l = \frac{n_i^l}{\Delta_i^l \cdot M}, i = \overline{1, I}, l = \overline{1, L}. \quad (20)$$

При цьому множину пар  $\left\{(\Delta_i^l, h_i^l), i = \overline{1, I}\right\}$  для реалізації  $T_{l\omega'}(m)$   $l$ -ої компоненти  $T_l(\omega', m)$  можна подати або у вигляді таблиці або у графічному вигляді як гістограму, для прикладу на рис. 2 наведені результати таких обчислень для компонент вектора.

У критерії  $\chi^2$ -квадрат як міру відхилення емпіричної частоти  $h_i^l$  від відповідної теоретичної ймовірності  $p_i^l$  використовується величина

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^I \frac{\left(\frac{h_i^l}{M} - p_i^l\right)^2}{p_i^l}. \quad (21)$$

Величина  $\chi^2$  у виразі (21) є випадковою величиною, розподіл якої при  $M \rightarrow \infty$ , буде прямувати до  $\chi^2$ -розподілу  $P_q(x)$ , що залежить від параметру  $q$ , який називають числом степенів вільності, що дорівнює:

$$q = I - s - 1, \quad (22)$$

де  $s$  – кількість параметрів теоретичного розподілу, відносно якого здійснюється перевірка гіпотези про узгодженість емпіричного та теоретичного розподілів. У випадку нормальної розподіленості стаціонарних компонент вектора  $\Xi_L(\omega', m)$ ,  $s = 2$ .

Застосування  $\chi^2$ -тесту передбачає попереднє задання деякого рівня значимості  $\alpha$  (наприклад,  $\alpha = 0.01$ ;  $\alpha = 0.05$ ), що уможливорює обчислення квантилю  $\chi_{q\alpha}^2$  розподілу  $\chi^2$  для заданого  $\alpha$  та  $q$ . Якщо значення  $\chi^2$ , обчислене за формулою (21), більше  $\chi_{q\alpha}^2$ , то вважається, що теоретичний розподіл (наприклад, нормальний) погано узгоджується із результатами спостережень при заданому рівні значимості  $\alpha$ . І навпаки, якщо обчислене значення  $\chi^2$  менше  $\chi_{q\alpha}^2$ , то вважається, що теоретичний та емпіричний розподіли добре між собою узгоджуються.

### Отримані результати статистичного опрацювання

Для отримання вірогідного результату перевірки на нормальність закону розподілу ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, було опрацьовано реалізацію електрокардіосигналу у другому відведенні, яка містила 245 серцевих циклів та породжувалася роботою серця пацієнта із умовною нормою. Із зареєстрованої електрокардіограми згідно із методом автоматичного формування ритмокардіограми із підвищеною точністю, отримано реалізацію

$$\Xi_{3\omega'}(m) = \left\{ T_{l\omega'}(m), l = \overline{1, 3}, m = \overline{1, 245} \right\}$$

трикомпонентного вектора

$$\Xi_3(\omega', m) = \left\{ T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, 3}, m = \overline{1, 245} \right\}$$

стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей.

Перша компонента  $T_1(\omega', m)$  цього вектора є випадковою стаціонарною послідовністю, що описує тривалості  $P$ -інтервалів в електрокардіосигналі для всіх його 245 зареєстрованих циклах.

Графік реалізації  $T_{1\omega'}(m)$  цієї компоненти подано на рис. 1, а.

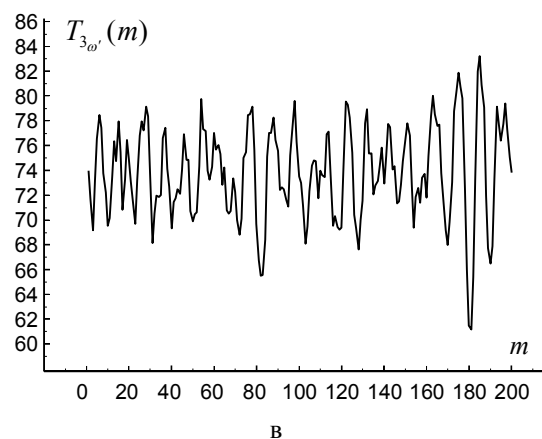
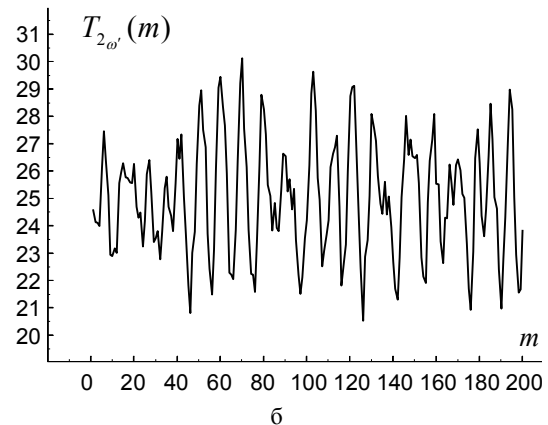
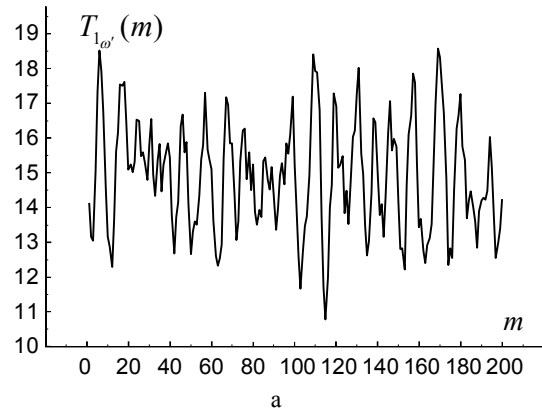


Рис. 1. Графіки реалізацій:  
а –  $T_{1\omega'}(m)$ ; б –  $T_{2\omega'}(m)$ ; в –  $T_{3\omega'}(m)$

Друга компонента  $T_2(\omega', m)$  цього вектора є випадковою стаціонарною послідовністю, що описує тривалості  $R$ -інтервалів в електрокардіосигналі.

Графік реалізації  $T_{2\omega'}(m)$  другої компоненти подано на рис. 1, б.

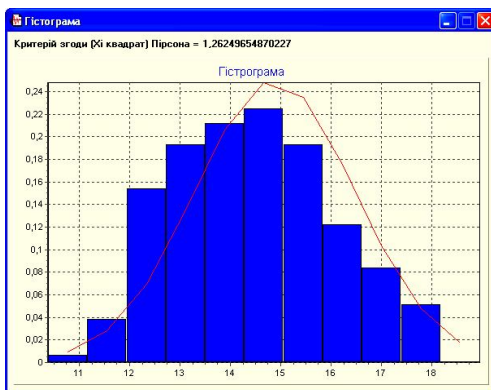
Третя компонента  $T_3(\omega', m)$  цього вектора є випадковою стаціонарною послідовністю, що описує тривалості  $T$ -інтервалів в електрокардіосигналі.

Графік реалізації  $T_{3\omega'}(m)$  третьої компоненти подано на рис. 1, в.

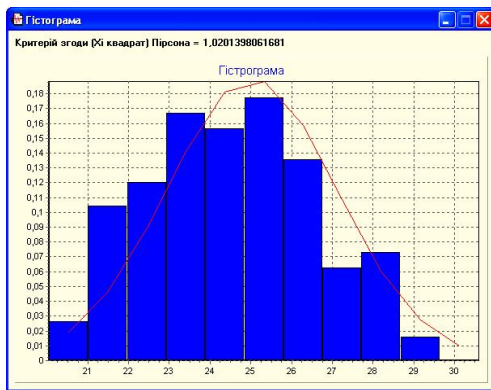
Число ступенів свободи було вибрано рівним  $q = 7$ , рівень значимості  $\alpha = 0.05$ , і, відповідно квантиль  $\chi^2$ -розподілу з  $q$  ступенями свободи

$$\chi^2_{0.95,7} = 14.07.$$

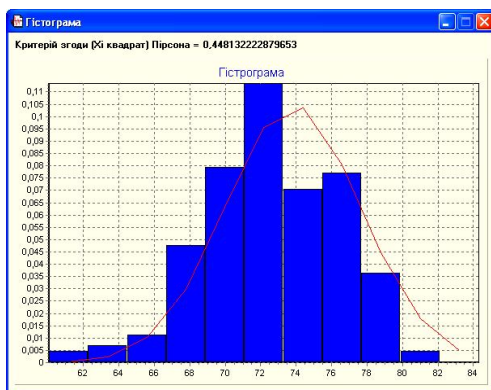
На рис. 2, а-в подано гістограми для реалізацій  $T_{1\omega'}(m)$ ,  $T_{2\omega'}(m)$  та  $T_{3\omega'}(m)$  відповідних трьох стаціонарних компонент вектора  $\Xi_3(\omega', m)$ .



а



б



в

Рис. 2. Гістограми для: компонент: а –  $T_1(\omega', m)$ ; б –  $T_2(\omega', m)$ ; в –  $T_3(\omega', m)$

У табл. 1 подано результати застосування  $\chi^2$ -тесту щодо перевірки на нормальність закону розподілу трьох стаціонарних компонент вектора  $\Xi_3(\omega', m)$ , що задають ритмокардіосигнал із підвищеною роздільною здатністю.

Таблиця 1 – Результати перевірки гіпотези

Номер стаціонарної компоненти	Значення квантилю $\chi^2_{q\alpha}$ при $\alpha = 0.05$ та $q = 7$	Значення реалізації випадкової величини $\chi^2$	Результат перевірки гіпотези
1	14,067	1,26	$\chi^2 < \chi^2_{q\alpha}$ (гіпотезу підтверджено)
2	14,067	1,02	$\chi^2 < \chi^2_{q\alpha}$ (гіпотезу підтверджено)
3	14,067	0,49	$\chi^2 < \chi^2_{q\alpha}$ (гіпотезу підтверджено)

Таким чином, на основі результатів перевірки гіпотези про нормальність розподілу стаціонарних компонент випадкового вектора  $\Xi_L(\omega', m)$  за критерієм згоди Пірсона, встановлено, що ці результати не суперечать гіпотезі про нормальність його розподілу. Нормальність вектора  $\Xi_L(\omega', m)$  є підставою для обґрунтування діагностичних ознак в системах аналізу серцевого ритму за ритмокардіограмою із підвищеною роздільною здатністю у рамках спектрально-кореляційної теорії, що суттєво знижує обчислювальну складність такого аналізу. У такому разі, для оцінювання ймовірносної структури вектора  $\Xi_L(\omega', m)$  стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей достатньо здійснити статистичне оцінювання лише вектора

$$C^1_L = \{c_{1l}, l = \overline{1, L}\}$$

його математичних сподівань згідно із формулою (15) та матрицю кореляційних функцій

$$R_T = [r_{2r_1 r_2}(u), l_1, l_2 = \overline{1, L}]$$

згідно із формулою (18).

### Обґрунтування вибору діагностичних ознак в системах аналізу серцевого ритму за ритмокардіосигналами із підвищеною роздільною здатністю

Важливим етапом розробки інформаційних систем аналізу серцевого ритму є обґрунтований вибір множини діагностичних ознак, за якими буде здійснюватися автоматизована процедура прийняття діагностичних рішень. До такої множини діагностичних ознак, переважно, висувають дві вимоги. Першою вимогою є вимога інформативності множини діагностичних ознак, а другою – вимога мінімальності їх кількості.

Перша вимога, що стосується інформативності діагностичних ознак полягає у спроможності за



цими ознаками розрізняти різні стани досліджуваної системи. Така інформативність діагностичних ознак визначається двома їх характеристиками, а саме, чутливістю діагностичних ознак до зміни стану регулятивних механізмів серцево-судинної системи та організму в цілому, а також нечутливістю до різного роду неінформативних шумових факторів (завад), які завжди присутні в ритмокардіосигналі. Одним із можливих кількісних індикаторів інформативності діагностичних ознак є відношення середньої відстані між діагностичними класами (навчачими сукупностями) та середнім діаметром відповідних класів, що відповідають різним станам серцево-судинної системи у метричному просторі діагностичних ознак. Якщо таке відношення є значним, то компоненти вектора діагностичних ознак вважаються інформативними.

Вимога мінімальної кількості діагностичних ознак забезпечує мінімальну розмірність простору діагностичних ознак, що, як наслідок, забезпечує мінімальну обчислювальну складність алгоритмів прийняття діагностичних рішень.

Проведемо обґрунтування множини діагностичних ознак для оцінювання стану регулятивних механізмів серцево-судинної системи та організму в цілому, а саме, таких сукупності діагностичних ознак, які, з однієї сторони, є інформативними, а із іншої - мають мінімальну кількість (обсяг). Спочатку зосередимо увагу на процедурі забезпечення мінімальності обсягу сукупності діагностичних ознак за ритмокардіосигналом із підвищеною роздільною здатністю.

Оскільки раніше було підтверджено гіпотезу про нормальність розподілу ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, то, як описано вище, початковою сукупністю діагностичних ознак є числовий вектор

$$\hat{\mathbf{C}}_L^1 = \left\{ \hat{c}_{1T_l}, l = \overline{1, L} \right\}$$

точкових оцінок математичних сподівань, які обчислюються згідно із виразом (15) та матриця оцінок кореляційних функцій

$$\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_1 T_2}(u), l_1, l_2 = \overline{1, L} \right],$$

які обчислювалися згідно із формулою (18). Одним із очевидних шляхів зменшення кількості діагностичних ознак за ритмокардіосигналом є врахування факту симетричності

$$(\hat{r}_{2T_1 T_2}(u) = \hat{r}_{2T_2 T_1}(u), l_1, l_2 = \overline{1, L})$$

матриці оцінок кореляційних функцій

$$\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_1 T_2}(u), l_1, l_2 = \overline{1, L} \right],$$

що вказує на достатність оцінювання лише тих елементів матриці  $\hat{\mathbf{R}}_T$ , які лежать на її діагоналі та вище діагоналі, а саме, такої упорядкованої сукупності

$$\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_1 T_2}(u), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L} \right].$$

На діагоналі цієї матриці, коли  $l_1 = l_2$ , розміщені оцінки автокореляційних функцій, а елементи матриці  $\hat{\mathbf{R}}_T$ , які розміщені над її діагоналлю, тобто, коли  $l_1 < l_2$ , є оцінками взаємокореляційних функцій. Тому матрицю

$$\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_1 T_2}(u), l_1, l_2 = \overline{1, L} \right]$$

не втративши інформативності можна замінити трикутною матрицею

$$\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_1 T_2}(u), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L} \right].$$

Ще одним шляхом зменшення кількості діагностичних ознак у інформаційних системах аналізу серцевого ритму на основі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю є використання спектральних розкладів самих елементів трикутної матриці

$$\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_1 T_2}(u), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L} \right],$$

зокрема, шляхом використання дискретного перетворення Фур'є оцінок автокореляційних та взаємокореляційних функцій із цієї матриці. А саме, замість трикутної матриці

$$\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_1 T_2}(u), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L} \right]$$

кореляційних функцій можна використовувати трикутну матрицю

$$\hat{\mathbf{S}}_T = \left[ \hat{S}_{2T_1 T_2}(v), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L} \right],$$

елементи якої є Фур'є-образами відповідних оцінок кореляційних функцій із матриці  $\hat{\mathbf{R}}_T$ . А саме, Фур'є-образи із матриці  $\hat{\mathbf{S}}_T$  обчислюються так:

$$\begin{aligned} \hat{S}_{2T_1 T_2}(v) &= \sum_{u=0}^{M_1-1} \hat{r}_{2T_1 T_2}(u) \cdot e^{-j2\pi uv / M_1}, v = \overline{0, M_1-1}, l_1 = \overline{1, L}, \\ &= \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L}, j = \sqrt{-1}. \end{aligned} \quad (23)$$

Виходячи із нерівності Бесселя, як діагностичні ознаки будемо обирати не всю множину

$$\left\{ \hat{S}_{2T_1 T_2}(v), v = \overline{0, M_1-1} \right\}$$

віддіків функцій  $\hat{S}_{2T_1 T_2}(v)$ , а лише певну підмножину їх перших  $M_2$  ( $M_2 \ll M_1$ ) віддіків

$$\left\{ \hat{S}_{2T_1 T_2}(v), v = \overline{0, M_2-1} \right\},$$

які вносять вклад у повну енергію оцінки  $\hat{r}_{2T_1 T_2}(u)$  кореляційної функції не менше 95%.

Наведемо приклад статистичного оцінювання елементів вектора

$$C_L^1 = \{c_{1T_l}, l = \overline{1, L}\}$$

математичних сподівань, елементів матриці кореляційних функцій

$$R_T = [r_{2T_l T_{l_2}}(u), l_1, l_2 = \overline{1, L}]$$

та елементів матриці Фур'є-образів

$$\hat{S}_T = [\hat{S}_{2T_l T_{l_2}}(v), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L}]$$

за однією реалізацією

$$\Xi_{3, \omega'}(m) = \{T_{l, \omega'}(m), l = \overline{1, 3}, m = \overline{1, 245}\}$$

трикомпонентного вектора

$$\Xi_3(\omega', m) = \{T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, 3}, m = \overline{1, 245}\}$$

стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей.

На рис. 3 подано графіки реалізації  $\hat{r}_{2T_l T_l}(u)$  статистичної оцінки автокореляційної функції  $r_{2T_l T_l}(u)$  ( $l_1 = l_2 = 1$ ) двох компонент вектора  $\Xi_3(\omega', m)$ .

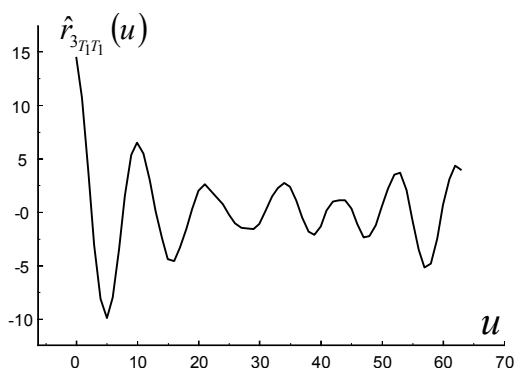
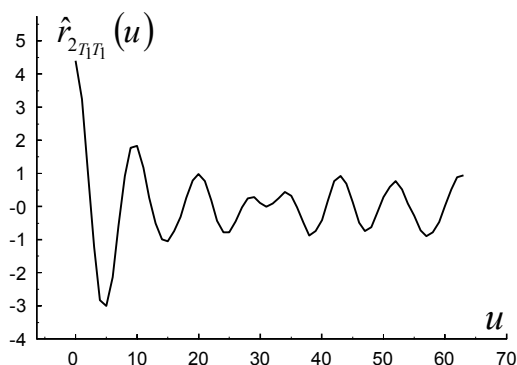


Рис. 3. Графіки реалізації статистичної оцінки автокореляційної функції

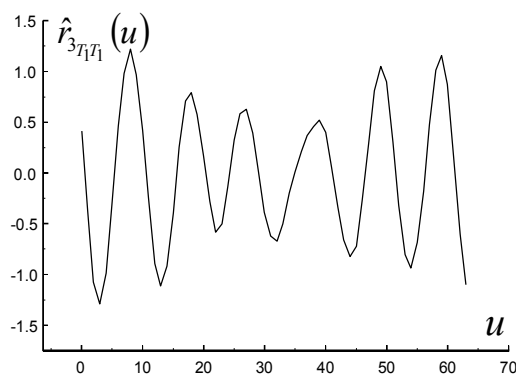
У табл. 2 подано результати статистичного оцінювання математичних сподівань стаціонарних компонент вектора  $\Xi_3(\omega', m)$ .

Таблиця 2 – Значення реалізації статистичної оцінки математичного сподівання

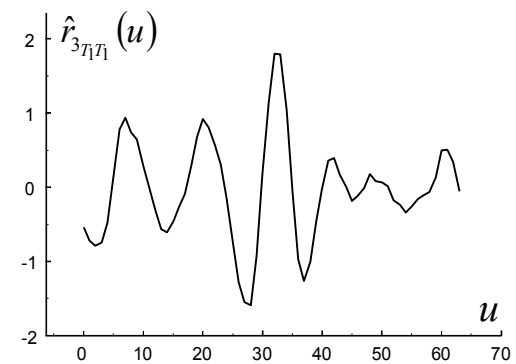
Номер стаціонарної компоненти	Значення реалізації статистичної оцінки математичного сподівання
1	$c_{1T_1} = 14,88$
2	$c_{1T_2} = 25,02$
3	$c_{1T_3} = 73,82$

На рис. 4 подано графіки реалізації статистичних оцінок взаємних кореляційних функцій компонент вектора  $\Xi_3(\omega', m)$ :

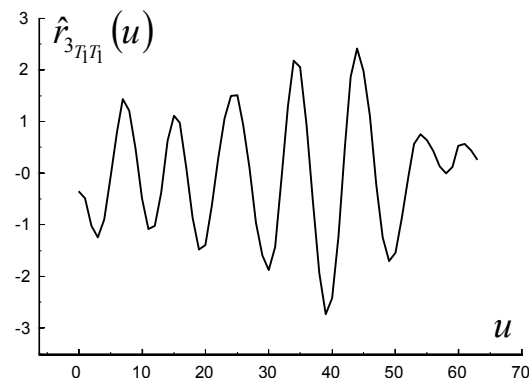
– рис. 4, а:  $\hat{r}_{2T_1 T_2}(u)$  – статистична оцінка взаємкореляційної функції  $r_{2T_1 T_2}(u)$  ( $l_1 = 1, l_2 = 2$ ) першої  $T_1(\omega', m)$  та другої  $T_2(\omega', m)$  компоненти;



а



б



в

Рис. 4. Графіки реалізації статистичних оцінок взаємних кореляційних функцій компонент вектора  $\Xi_3(\omega', m)$

– рис. 4, в:  $\hat{r}_{2_{T_1 T_3}}(u)$  статистичної оцінки взаємкореляційної функції  $r_{2_{T_1 T_3}}(u)$  ( $l_1 = 1, l_2 = 3$ ) першої  $T_1(\omega', m)$  та третьої  $T_3(\omega', m)$  компоненти.

– рис. 4, б:  $\hat{r}_{2_{T_1 T_3}}(u)$  статистичної оцінки взаємкореляційної функції  $r_{2_{T_1 T_3}}(u)$  ( $l_1 = 1, l_2 = 3$ ) першої  $T_1(\omega', m)$  та третьої  $T_3(\omega', m)$  компоненти;

На рис. 5 подано графіки реалізації статистичних оцінок спектральної щільності:

– рис. 5, а:  $\hat{S}_{2_{T_1 T_1}}(\nu) - S_{2_{T_1 T_1}}(\nu)$  ( $l_1 = l_2 = 1$ ) першої компоненти  $T_1(\omega', m)$ , що описує тривалості  $P$ -інтервалів в електрокардіосигналі;

– рис. 5, б:  $\hat{S}_{2_{T_2 T_2}}(\nu) - S_{2_{T_2 T_2}}(\nu)$  ( $l_1 = l_2 = 2$ ) другої компоненти  $T_2(\omega', m)$ , що описує тривалості  $R$ -інтервалів в електрокардіосигналі;

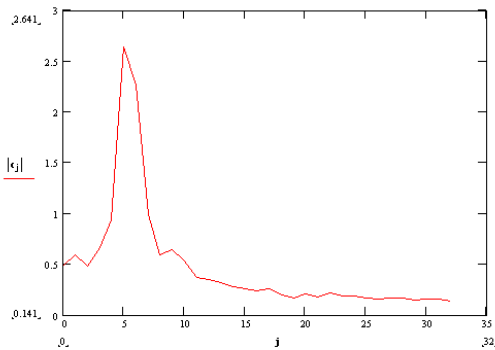
– рис. 5, в:  $\hat{S}_{2_{T_3 T_3}}(\nu) - S_{2_{T_3 T_3}}(\nu)$  ( $l_1 = l_2 = 3$ ) третьої компоненти  $T_3(\omega', m)$ , що описує тривалості  $T$ -інтервалів в електрокардіосигналі.

На рис. 6 подано графіки реалізації  $\hat{S}_{2_{T_1 T_2}}(\nu)$  статистичної оцінки взаємспектральної щільності потужності  $S_{2_{T_1 T_2}}(\nu)$  ( $l_1 = 1, l_2 = 2$ ) першої  $T_1(\omega', m)$  та другої  $T_2(\omega', m)$  компоненти вектора  $\Xi_3(\omega', m)$ :

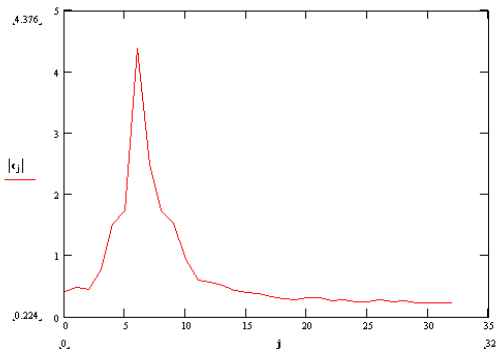
– рис. 6, а:  $\hat{S}_{2_{T_1 T_2}}(\nu) - S_{2_{T_1 T_2}}(\nu)$  ( $l_1 = 1, l_2 = 2$ ) першої  $T_1(\omega', m)$  та другої  $T_2(\omega', m)$  компоненти;

– рис. 6, б:  $\hat{S}_{2_{T_1 T_3}}(\nu) - S_{2_{T_1 T_3}}(\nu)$  ( $l_1 = 1, l_2 = 3$ ) першої  $T_1(\omega', m)$  та третьої  $T_3(\omega', m)$  компоненти

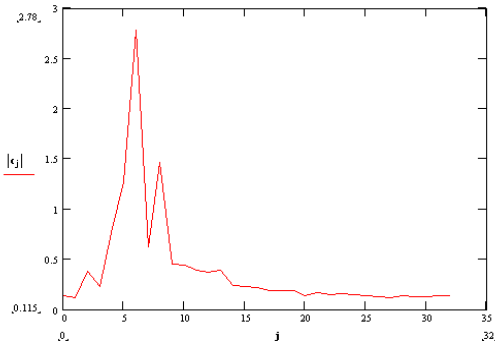
– рис. 6, в:  $\hat{S}_{2_{T_2 T_3}}(\nu) - S_{2_{T_2 T_3}}(\nu)$  ( $l_1 = 2, l_2 = 3$ ) другої  $T_2(\omega', m)$  та третьої  $T_3(\omega', m)$  компоненти.



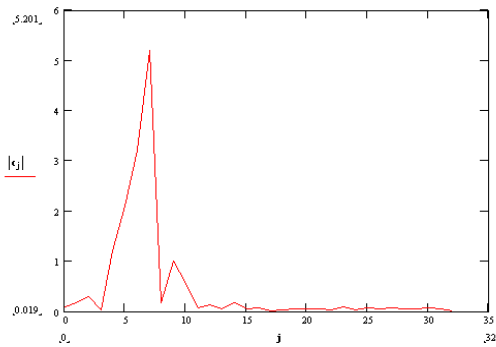
а



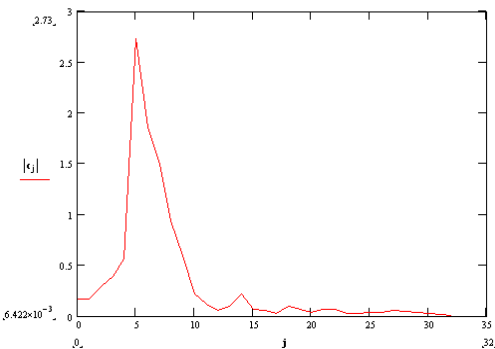
а



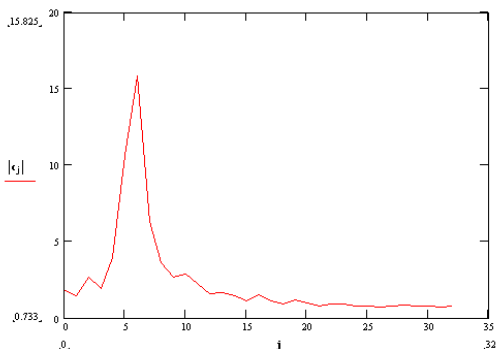
б



б



в



в

Рис. 5. Графіки реалізації статистичних оцінок спектральної щільності

Рис. 6. Графіки реалізації статистичної оцінки взаємспектральної щільності потужності  $S_{2_{T_1 T_2}}(\nu)$  першої та другої компоненти вектора  $\Xi_3(\omega', m)$

### Висновки

У роботі розроблено методи статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю на основі моделі у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей. Проведені статистичні експерименти підтвердили гіпотезу про нормальність закону розподілу компонент векторного ритмокардіосигналу. Проведений розклад статистичних оцінок автокореляційних та

взаємочореляційних функції дозволив отримати спектральні та взаємоспектральної щільності потужності компонент вектора, що дозволило зменшити розмірність простору діагностичних ознак в системах аналізу серцевого ритму за ритмокардіосигналами із підвищеною роздільною здатністю.

Розроблені статистичні методи можуть бути використані при побудові спеціалізованого програмного забезпечення в автоматизованих кардіодіагностичних комплексах, зокрема, підсистем аналізу ритму.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука. 1984. 222 с.
2. Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования. Рабочая группа Европейского Кардиологического общества и Северо-Американского общества стимуляции и электрофизиологии // Вестник аритмологии. 1999. вып 11. С. 52-77.
3. Воскресенский А.Д., Вентцель М.Д. Статистический анализ сердечного ритма и показатели гемодинамики в физиологических исследованиях // Проблемы космической биологии. М., 1974. С. 42.
4. Зарубин Ф.Е. Вариабельность сердечного ритма: стандарты измерения, показатели, особенности метода. // Вестник аритмологии. 1998. Вып.10. С.25-30.
5. Калакутский Л.И., Манелис Э.С. Мониторинг параметров вариабельности сердечного ритма в медицине критических состояний. Инженерно-медицинский центр "Новые приборы", Самара Медицина, фармация №14, 2001.
6. Рагозин А.Н. Спектральный анализ вариабельности сердечного ритма на плоскости комплексных частот // Уральский кардиологический журнал (в печати).
7. Рагозин А.Н., Кононов Д.Ю. Анализ спектральной структуры многоканальных физиологических сигналов. // Цифровые радиоэлектронные системы (электронный журнал). 1999. вып. 3. (<http://www.prima.tu-chel.ac.ru/drs/>).
8. Рябыкина Г.В., Соболев А.В. Вариабельность ритма сердца. М.: Стр'Ко, 1998.
9. S. Lupenko, N. Lutsyk, O. Yasniy and L. Sobaszek, "Statistical analysis of human heart with increased informativeness," *Acta mechanica et automatica*, vol. 12, 2018, pp. 311-315.
10. Serhii Lupenko, Nadiia Lutsyk, Oleh Yasniy, Andriy Zozulia The Modeling and Diagnostic Features in the Computer Systems of the Heart Rhythm Analysis with the Increased Informativeness. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). IEEE, 2019. pp. 121-124.
11. Лупенко С., Сверстюк А., Луцик Н., Стадник Н., Зозуля А. Умовний циклічний випадковий процес як математична модель коливних сигналів та процесів із подвійною стохастичністю. Поліграфія і видавнича справа. *Printing and Publishing*, No.1 (71) 2016. Львів, 2016. С. 147-159.
12. Лупенко С., Зозуля А., Сверстюк А., Стадник Н. Математичне моделювання та методи опрацювання сигналів серця на базі циклічних випадкових процесів та векторів. *Sciences and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI(20), ISSUE 172, July 2018. Budapest 2018. pp. 47-54.

Received (Надійшла) 18.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Methods of statistical processing of ritmocardiosignal with increased division on the basis of its model in the view of stationary invention vector

Litvinenko Y., Lupenko S., Oniskiv P., Trisnyuk V., Zozulya A.

**Abstract.** The work is devoted to methods of statistical estimation of probabilistic characteristics of rhythmocardio signal with high resolution on the basis of its model in the form of a vector of stationary and stationary related random processes. The hypothesis about the normality of the law of distribution of components of the rhythmocardio signal with high resolution was confirmed. In real computer systems of cardiac rhythm analysis, a finite number of cycles of the electrocardio signal is always recorded, so this fact should be taken into account also in the statistical evaluation of the probabilistic characteristics of the rhythm cardio signal with high resolution. Namely, the statistical estimation of the probabilistic characteristics of a rhythmocardio signal with a high resolution is to obtain the implementation of statistical estimates, which can be taken to approximate the corresponding probabilistic characteristics of the studied rhythmocardio signal. To take into account the temporal dynamics of high-resolution rhythmocardio signal it is necessary to use mathematical apparatus of the theory of random processes, namely, to consider it as a vector of discrete random processes. The vector of diagnostic features in the systems of cardiac rhythm analysis based on the rhythmocardio signals with high resolution is substantiated. Conducted statistical experiments confirmed the hypothesis about the normality of the law of distribution of components of the vector rhythmocardio signal. The developed statistical methods can be used in the construction of specialized software in automated cardiadiagnostic complexes, in particular, rhythm analysis subsystems.

**Keywords:** methods of statistical estimation, probabilistic characteristics, vector of stationary and stationary-related random sequences, electrocardio signal, rhythm cardio signal, heart rate.

В. В. Міхав, Є. В. Мелешко, М. С. Якименко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## МЕТОД ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ БІНАРНИХ ДІАГРАМ РІШЕНЬ

**Анотація.** Стаття присвячена дослідженню методів збереження даних рекомендаційних систем. Запропоновано та досліджено використання бінарних діаграм рішень для збереження таких даних. Внаслідок великого розміру рекомендаційних систем суттєвими є обмеження по оперативній пам'яті. Метою роботи є розробка методу зберігання даних рекомендаційної системи у формі бінарних діаграм рішень та порівняння з методами збереження на основі інших структур даних. Дані рекомендаційної системи зберігаються у вигляді графу із вершинами, які представляють користувачів системи та об'єкти системи, а ребра – дії користувачів системи, відношення подібності, зв'язки рекомендацій тощо. Для підвищення ефективності у випадку інтенсивного редагування графу запропоновано збереження даних на основі "гарячого" (хеш-таблиця) та "холодного" (бінарна діаграма рішень) сховищ. Проведено серію експериментів для перевірки ефективності розробленого способу зберігання даних, для чого розроблено програмну модель спрощеної рекомендаційної системи та описано алгоритм роботи такої системи. В чисельному експерименті запропонований спосіб зберігання даних на основі бінарних дерев рішень порівнюється із трьома іншими: на основі бітових масивів, зв'язних списків та хеш-таблиць. Розглянуто переваги та недоліки реалізації кожного із вказаних методів. В ході експерименту для різних значень кількості агентів, предметів, сесій та вподобань досліджено максимальні та мінімальні значення використаної оперативної пам'яті, а також час генерації лайків, сесій та рекомендацій. Встановлено, що у випадку застосування бінарних діаграм рішень обсяг використаної оперативної пам'яті є нижчим за інші способи при меншій швидкодії, що частково може бути компенсовано декількома застосованими оптимізаціями. Завдяки меншому використанню оперативної пам'яті можна зберігати інформацію про більшу кількість вподобань, що може виявитися корисним у випадку великих розмірів графу рекомендаційної системи. Можливість для бінарних діаграм рішень пошуку даних за частковими ключами додатково дозволяє зберігати дані більшої розмірності.

**Ключові слова:** рекомендаційні системи, бінарні діаграми рішень, зв'язані списки, хеш-таблиці, комп'ютерне моделювання.

### Вступ

На сьогоднішній день рекомендаційні системи (РС) мають широке застосування у соціальних мережах, системах Інтернет-торгівлі, поширенні медіа-контенту, реклами тощо [1, 2]. Ефективний спосіб представлення даних, необхідних для роботи такої системи, може зменшити кількість потрібних ресурсів та полегшити розробку і використання більш складних алгоритмів для формування списків рекомендацій.

В наш час існує багато різних систем управління базами даних, крім реляційних баз даних широке застосування отримують бази даних типу NoSQL [3, 4] з різними способами зберігання даних, зокрема, Сховища типу «ключ-значення» (Key-value stores), Масштабовані розподілені сховища (Column Family (Bigtable) stores), графові СУБД (Graph Stores), документо-орієнтовані СУБД (Document Stores) [3-5].

Спосіб збереження даних рекомендаційної системи є важливим з точки зору якості її роботи, швидкості, можливості масштабування, зручності виконання основних операцій з даними для формування рекомендацій.

Все частіше для зберігання даних рекомендаційних систем та інших додатків починають використовувати графові моделі [6-8], також графова форма представлення даних стає поширеною у програмному моделюванні складних систем та мереж [9-12], і це відбувається через ряд переваг графових моделей [8, 13]. Яскравим прикладом такого підходу являється побудова рекомендаційних систем з застосуванням графової СУБД Neo4j [14]. Графові моделі СУБД надають не лише зручний формат збе-

рігання даних, а й зручний формат запитів. В документації до Neo4j є приклади реалізації алгоритмів формування рекомендацій запитом до цієї СУБД, що ілюструє її придатність для використання в РС.

Існують різні способи представлення графів в комп'ютерних системах, зокрема, таблиці суміжності, списки ребер, матриці інцидентності тощо [15]. Також графи можна зберігати у вигляді бінарних діаграм рішень, які по суті являються економною формою представлення булевих функцій у вигляді орієнтованого ациклічного графа [16-18].

На даний момент практично не досліджено можливість використовувати бінарні діаграми рішень для зберігання даних рекомендаційної системи.

Метою даної роботи була розробка методу зберігання даних рекомендаційної системи у формі бінарних діаграм рішень, а також дослідження ефективності даного методу шляхом експериментів на програмній моделі рекомендаційної системи.

### Основна частина

Дані рекомендаційної системи зручно представляти у вигляді графу. Один з найбільш поширених способів зберігання графів у комп'ютерних програмах – використання матриці суміжності [15]. Матриця суміжності графу  $A$  містить значення булевого типу, тобто вона є матричним представленням булевої функції  $F$ , яка описує наявність дуги між двома вузлами. Якщо орграф  $G$  помічений, то необхідно також зберегти його вагу.

Представлення булевої функції як таблиці істинності чи досконалої кон'юнктивної/диз'юнктивної нормальної форми потребує  $\Omega(2^{m+1})$  пам'яті та вимагає значних обчислень для визначення значення фун-

кції. Тому у даній роботі пропонується дослідити використання бінарних діаграм рішень для зберігання графу даних рекомендаційної системи.

Бінарні діаграми рішень (БДР) – це економна форма представлення булевих функцій у вигляді орієнтованого ациклічного графу (рис. 1). Вершини графу представляють аргументи функції, листки – її двійкові значення [16-18]. Для додавання і вилучення ребер та зміни ваги ребер необхідно мати можливість редагувати дані графу. БДР дають можливість зберігати дані у стисненому вигляді та швидко отримувати значення функції за її параметрами, але редагування БДР вимагає складних обчислень. При представленні булевих функцій у формі БДР стало можливим розв'язувати багато проблем, які при традиційних представленнях структур нерозв'язні через значну розмірність таких представлень і складність операцій над ними. БДР можуть успішно застосовуватися фактично в кожній галузі, де потрібно обробляти дискретні структури даних.

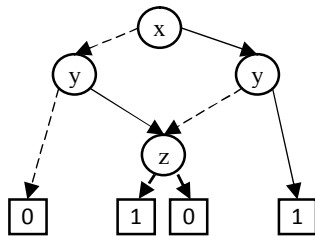


Рис. 1. Приклад бінарної діаграми рішень

**Адаптація БДР для представлення орієнтованих графів з даними рекомендаційної системи.** Коли дані рекомендаційної системи зберігаються у вигляді графу, то як правило вони мають такий формат:

- вершини графу – користувачі системи, об'єкти системи (контент, товари, тощо).
- ребра графу – дії користувачів по відношенню до об'єктів (перегляди, оцінки, тощо), відношення подоби, зв'язки рекомендацій типу користувачу-рекомендовано-об'єкт, тощо.

Була досліджена можливість зберігати граф рекомендаційної системи у пам'яті у вигляді бінарної діаграми рішень. Для проведення експерименту по вивченню потреб в оперативній пам'яті було розроблено програмну модель спрощеної рекомендаційної системи, в якій було виділено три основні сутності – агент, сесія та предмет.

Рекомендаційна система отримує такі параметри:  $n_a$  – кількість агентів,  $n_s$  – кількість сесій,  $n_i$  – кількість предметів,  $n_{al}$  – максимальна кількість вподобань агента,  $n_{sl}$  – максимальний розмір сесії.

РС у розробленій програмній моделі працює за таким алгоритмом:

1. Для кожного з  $n_a$  агентів випадковим чином генерується від 1 до  $n_{al}$  вподобань (рис. 2). При цьому унікальність вподобань не перевіряється, тому реальна кількість вподобань може виявитися менше.
2. Створюється  $n_s$  сесій. До кожної сесії закріплюється випадковим чином обраний агент. Потім серед вподобань цього агента випадковим чином обирається від 1 до  $\min(n_{al}, n_{sl})$  вподобань, які копіюються до сесії (рис. 3).

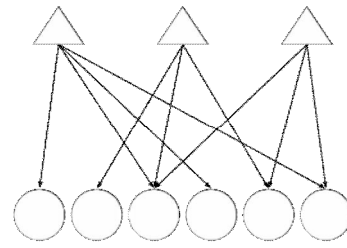


Рис. 2. Створення вподобань для агентів (трикутники – агенти, круги – предмети)

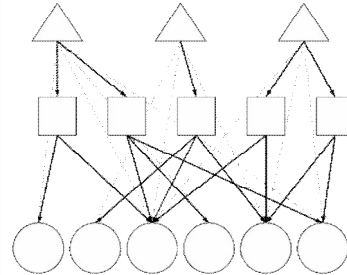


Рис. 3. Створення сесій та вподобань для них (трикутники – агенти, квадрати – сесії, круги – предмети; сесія містить вподобання агента, які він зробив за одне відвідування ресурсу)

3. Випадковим чином обирається контрольна сесія, для якої буде сформовано рекомендацію.

4. Визначаються усі предмети, які належать до контрольної сесії (рис. 4).

5. Здійснюється пошук усіх сесій, вподобання яких мають перетин із вподобаннями контрольної сесії (рис. 5). На цьому етапі є можливість відфільтрувати сесії за розміром перетину.

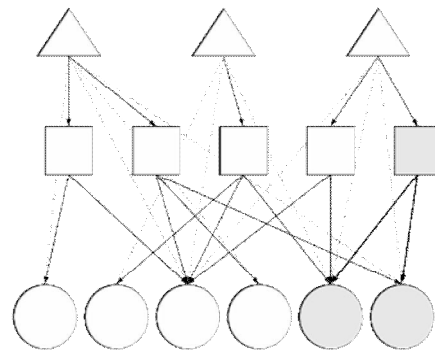


Рис. 4. Визначення контрольної сесії (трикутники – агенти, квадрати – сесії, круги – предмети)

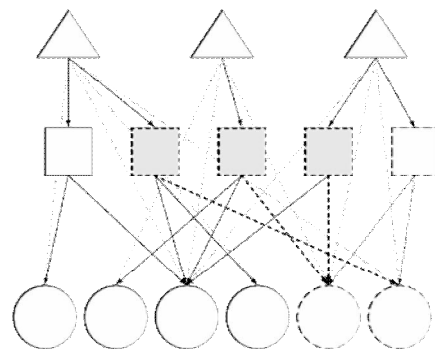


Рис. 5. Пошук сесій, які мають перетин із контрольною сесією (трикутники – агенти, квадрати – сесії, круги – предмети)

6. Визначаються предмети, які буде рекомендовано. Здійснюється пошук усіх предметів, які належать хоча б одній з відібраних сесій, але не належать до контрольної сесії (рис. 6). На цьому етапі є можливість відфільтрувати предмети за кількістю закріплених сесій.

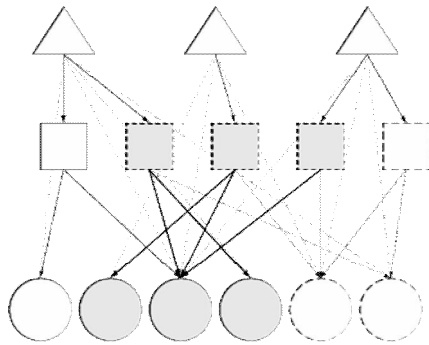


Рис. 6. Вибірка предметів для формування рекомендації (трикутники – агенти, квадрати – сесії, круги – предмети)

**Накопичення змін до БДР.** Якщо алгоритм передбачає періоди інтенсивного редагування графу, можна тимчасово зберігати зміни у структурі даних, більш пристосованій до внесення змін. Можна застосувати ідею “гарячого” (хеш-таблиця) та “холодного” (БДР) сховищ. У хеш-таблицю заносяться параметри функції, на яких необхідно змінити значення, та саме значення. При досягненні певного розміру або по завершенню логічного блоку операцій із хеш-таблиці формується коригуюча БДР, яка потім зливається із основною. При читанні значень необхідно спочатку перевірити існування значення у хеш-таблиці, і у випадку його відсутності читати із БДР. Складність використання цього підходу полягає у виборі булевої операції, яка буде використовуватися при злитті БДР. Одним з найкращих підходів є використання операції XOR стає, особливо коли необхідно зберігати інформацію не лише про факт наявності дуги між вузлами, а й зберігати вагу цієї дуги. Для цього можна виділити додаткову групу змінних, яка відповідатиме за представлення ваг у БДР.

Було проведено серію експериментів для перевірки ефективності запропонованого способу зберігання даних на основі бінарних діаграм рішень, та порівняння його з іншими способами зберігання даних в інших структурах даних.

У проведених експериментах було здійснено порівняння 4-х різних реалізацій – на основі бінарних діаграм рішень, бітових масивів, зв’язних списків та хеш-таблиць. Кожна реалізація дотримується описаного вище алгоритму програмного моделювання рекомендаційної системи, але має певні відмінності.

Реалізація на основі бітових масивів найпростіша, оскільки у цьому випадку є можливість отримати прямий доступ до значення за номером агента/сесії та предмету, але це вимагає значних витрат пам’яті.

Інші структури даних більш складні, тому для прискорення їх роботи для збереження інформації про перетин із контрольною сесією було застосовано хеш-таблиці. Також вони не дають можливості виби-

рати випадковий елемент, тому на етапі створення сесій відбувається повний перебір вподобань агента, доки вони не закіняться або доки не буде відібрано необхідну кількість вподобань. Для кожного вподобання агента обирається випадкове число, на основі якого визначається, чи заносити вподобання до сесії.

Зв’язні списки дозволяють зберігати інформацію лише про існуючі вподобання, завдяки чому вони використовують менше пам’яті ніж бітові масиви. Проте через те, що вони не дають доступу до елементів у випадковому порядку, пошук перетину двох сесій займає багато часу.

Хеш-таблиці дозволяють отримати доступ до елемента за ключем, завдяки чому можна покращити результати, отримані за допомогою зв’язних списків. Якщо у випадку зв’язних списків складність пошуку перетину квадратична, то у випадку хеш-таблиці вона лінійна.

Дані рекомендаційної системи під час експериментів зберігалися в оперативній пам’яті з можливістю зберігання у текстових файлах. Для експериментів використовувався персональний комп’ютер з 24 Гб оперативної пам’яті. Прочерки у комітках показують, що не можливо було отримати результат через нестачу оперативної пам’яті.

Результати експериментів наведені у табл. 1, де:

- agentCount – кількість агентів;
- itemsCount – кількість предметів;
- sessionsCount – кількість сесій;
- sessionsSize – розмір сесії;
- maxLikes – максимальна кількість лайків.

Бінарні діаграми рішень мають як переваги, так і недоліки у порівнянні з хеш-таблицями, бітовими масивами та зв’язними списками. БДР дають можливість шукати дані за частковими ключами, що додатково дозволяє зберігати зв’язки більшої розмірності. Бінарні діаграми даних зберігають дані з меншими витратами пам’яті, ніж хеш-таблиці, завдяки чому у оперативній пам’яті одночасно можна розмістити інформацію про більшу кількість вподобань. БДР програють у швидкості, проте нами було застосовано кілька оптимізацій:

- підтримка унікальності фрагментів БДР обчислювально дуже дорога, тому вона була відділена від процедури редагування і виконується кілька разів за час генерації тестових даних;

- видалення надлишкових фрагментів з БДР спричиняє розрідженість вузлів у пам’яті, через що зростає час доступу до вузла. Тому після видалення надлишкових вузлів вони ущільнюються шляхом перенесення у нову область пам’яті;

- ущільнення вузлів дає можливість звільнити певну кількість пам’яті, проте виявилось, що звільнення пам’яті у цій ситуації неефективне – наступні операції редагування вимагають створення нових вузлів, через що потрібно буде повторно переносити вузли між областями пам’яті;

- для здійснення пошуку у БДР її необхідно проіндексувати відповідно до ключа та параметрів пошуку, а обхід усіх вузлів БДР – це дорога операція. Для прискорення пошуку було покращено процедуру індексування, завдяки чому пошук з вказаною першою частиною ключа не вимагає повторної індексації.



Таблиця 1 - Результати експериментів

Структура даних	Використана пам'ять, мін. знач., Gb	Використана пам'ять, макс. знач., Gb	Час генерації лайків, ms	Час генерації сесій, ms	Час генерації рекомендацій, ms
<i>agentCount = 4096, itemsCount = 8192, sessionsCount = 16384, sessionSize = 64, maxLikes = 640</i>					
БДР	0,024	0,037	2562	2209	411
Хеш-таблиця	0,106	0,106	76	103	25
Біговий масив	0,166	0,166	12	127	111
Зв'язний список	0,108	0,108	78	120	247
<i>agentCount = 16384, itemsCount = 32768, sessionsCount = 65536, sessionSize = 128, maxLikes = 1024</i>					
БДР	0,17	0,29	31408	34551	5240
Хеш-таблиця	0,46	0,46	369	702	179
Біговий масив	2,5	2,5	179	1327	1623
Зв'язний список	0,79	0,79	516	721	2823
<i>agentCount = 32768, itemsCount = 65536, sessionsCount = 131072, sessionSize = 192, maxLikes = 1536</i>					
БДР	0,452	0,733	95075	106675	23327
Хеш-таблиця	1,1	1,1	1168	2013	640
Біговий масив	-	-	-	-	-
Зв'язний список	2,2	2,2	1499	2112	9973
<i>agentCount = 65536, itemsCount = 131072, sessionsCount = 262144, sessionSize = 192, maxLikes = 1536</i>					
БДР	0,786	1,3	210945	237214	45766
Хеш-таблиця	2,2	2,2	2312	4034	316
Біговий масив	-	-	-	-	-
Зв'язний список	4,5	4,5	2989	4323	23223
<i>agentCount = 131072, itemsCount = 262144, sessionsCount = 524288, sessionSize = 256, maxLikes = 2048</i>					
БДР	1,8	3,6	607610	682754	153045
Хеш-таблиця	6,4	6,4	6082	12327	3954
Біговий масив	-	-	-	-	-
Зв'язний список	12,1	12,1	8052	11195	74346
<i>agentCount = 262144, itemsCount = 524288, sessionsCount = 1048576, sessionSize = 256, maxLikes = 2048</i>					
БДР	3,4	7,2	1366467	1551391	313122
Хеш-таблиця	12,8	12,8	12268	24666	6221
Біговий масив	-	-	-	-	-
Зв'язний список	24	24	16051	22323	146845
<i>agentCount = 524288, itemsCount = 1048576, sessionsCount = 2097152, sessionSize = 256, maxLikes = 2048</i>					
БДР	6,5	14,4	3170877	3623865	643864
Хеш-таблиця	25,5	25,5	24204	116728	44527
Біговий масив	-	-	-	-	-
Зв'язний список	-	-	-	-	-

### Висновки

У роботі розроблено метод зберігання даних рекомендаційної системи на основі бінарних діаграм рішень. Також запропоновано використання двох видів сховищ даних (гарячого та холодного) для підвищення ефективності роботи системи і описано спосіб їх злиття. Розроблено програмну модель спрощеної

рекомендаційної системи та описано алгоритм роботи такої системи. На основі розробленої програмної моделі проведено експерименти для перевірки працездатності та ефективності розробленого методу зберігання даних РС на основі БДР та для порівняння його з іншими методами зберігання даних.

Результати експерименту показали, що у випадку застосування бінарних діаграм рішень оперативна па-

м'ять використовуються більш економно в порівнянні із хеш-таблицями, бітовими масивами та зв'язними списками. Для компенсації меншої швидкості роботи з даними в оперативній пам'яті при використанні БДР запропоновано декілька оптимізацій. Завдяки меншому використанню оперативної пам'яті можна зберегти інформацію про більшу кількість вподобань користу-

вачів рекомендаційної системи при виконанні обчислень для формування рекомендацій. Даний факт є суттєвим у випадку великих розмірів графів, що характерно для реальних рекомендаційних систем. Крім того, можливість пошуку даних за частковими ключами в бінарних діаграмах рішень дозволяє додатково збільшити розмірність даних, що зберігаються.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. "Recommender Systems Handbook" (2010) Editors F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira, P. B. Kantor, New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 842 p.
2. Jones M. (2013) "Recommender systems, Part 1. Introduction to approaches and algorithms. Learn about the concepts that underlie web recommendation engines", URL: [https://www.ibm.com/developerworks/opensource/library/os-recommender1/index.html?s\\_tact=105agx99&s\\_cmp=cp](https://www.ibm.com/developerworks/opensource/library/os-recommender1/index.html?s_tact=105agx99&s_cmp=cp)
3. Фаулер М., Садаладж П. Дж. (2013) "NoSQL: новая методология разработки нереляционных баз данных", Издательский дом «Вильямс», Москва, 192 с.
4. Meier A., Kaufmann M. (2019) "SQL & NoSQL Databases", Springer Vieweg, Wiesbaden, P. 201-218. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.468.7089&rep=rep1&type=pdf>
5. Cure O., Blin G (2014) "RDF Database Systems: Triples Storage and SPARQL Query Processing", Elsevier Science, 256 p.
6. Yi N., Li C., Feng X., Shi M. (2017) "Design and implementation of movie recommender system based on graph database", 14th Web Information Systems and Applications Conference (WISA), IEEE, P. 132-135.
7. Angles R. (2012) "A comparison of current graph database models", IEEE 28th International Conference on Data Engineering Workshops, IEEE, 2012, P. 171-177.
8. Засядко Г.Е., Карпов А.В. (2017) "Проблемы разработки графовых баз данных", // ИВД. №1 (44), URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-razrabotki-grafovyh-baz-dannyh>
9. Мелков С., Мусатов Д., Савватеев А. (2013), "Моделирование социальных сетей", URL: [https://kpfu.ru/docs/F117464271/MMS\\_socnet\\_cities.pdf](https://kpfu.ru/docs/F117464271/MMS_socnet_cities.pdf)
10. Берновски М.М., Кузюрин Н.Н. (2012) "Случайные графы, модели и генераторы безмасштабных графов" // Труды ИСП РАН. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sluchaynye-grafy-modeli-i-generatory-bezmasshtabnyh-grafov>
11. Райгородский А.М. (2012) "Математические модели Интернета", "Квант" №4, С. 12-16, URL: [https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/431792](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431792)
12. Meleshko Ye. (2019) "Computer model of virtual social network with recommendation system", Scientific journal Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, Kharkiv: NURE, Issue. 2 (8), P. 80-84
13. Робинсон Я., Вебер Д., Эйфрем Э. (2016) "Графовые базы данных: новые возможности для работы со связанными данными", М.: ДМК Пресс, 256 с.
14. "Neo4j Documentation" (2020) URL: <https://neo4j.com/docs>
15. Храбров Д. (2006) "Способы хранения графов в памяти компьютера", URL: <https://dexp.in/russian/graph-storage/>
16. Кнут Д.Э. (2013) "Искусство программирования, том 4А. Комбинаторные алгоритмы. Часть 1", М.: "Вильямс", 960 с.
17. Minato S. (2001) "Zero-suppressed BDDs and their applications", International Journal on Software Tools for Technology Transfer, №3.2 – pp. 156–170.
18. Міхав В.В. (2019) "Програмне забезпечення для моделювання мереж репутації користувачів соціальних веб-ресурсів на основі бінарних діаграм рішень", Системи управління, навігації та зв'язку, Т.5., №57, С. 78-83. – URL: <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/download/1720/1408>

Received (Надійшла) 25.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.05.2020

### Method for storing data of a recommender system based on binary decision diagrams

V. Mikhav, Ye. Meleshko, M. Yakymenko

**Abstract.** The paper is devoted to researching of methods for storing data of recommender systems. Usage of binary decision diagrams for saving such data is proposed and studied. Due to the large size of recommender systems, there are significant limitations on RAM. The purpose of the work is to develop a method of storing data of a recommender system as binary decision diagrams and to compare it with storing methods based on other data structures. The data of a recommender system is stored as a graph with vertices representing users and items of the system, and the edges representing the actions users, similarity relations, relationships of recommendations, et cetera. To increase efficiency in the case of intensive graph editing, data storing based on "hot" (hash table) and "cold" (binary decision diagram) storages is proposed. A series of experiments was made to test the efficiency of the developed method of data storing, for this a software model of a simplified recommender system was developed and the work algorithm of such a system was described. In the numerical experiment the proposed method of storing data based on binary decision trees is compared with three others: based on bit maps, linked lists and hash tables. The advantages and disadvantages of implementing for each of these methods are considered. During the experiment, for various values of the number of agents, items, sessions and preferences, it were investigated the maximum and minimum values of the used RAM, along with time for generating of likes, sessions and recommendations. It has been found that in the case of binary decision diagrams, the amount of used RAM is lower than other methods but at lower speeds, the latter can be partially compensated by several applied optimizations. Due to the less usage of RAM, it is possible to store information about a larger amount of preferences, it may be useful in the cases of large size of the recommender system graph. The ability for binary decision diagrams of data search by partial keys additionally allows to store larger data.

**Keywords:** recommender systems, binary solution diagrams, linked lists, hash tables, computer simulation.

Л. Г. Раскін, О. В. Сіра, Р. О. Корсун

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

## ДЕКОМПОЗИЦІЙНИЙ МЕТОД ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ АНАЛІЗУ МАРКОВСЬКИХ СИСТЕМ ВИСОКОЇ РОЗМІРНОСТІ

**Анотація.** Предметом вивчення статті є декомпозиційна обчислювальна процедура, яка використовує метод фазового укрупнення станів системи. **Мета** дослідження: розробка спеціального методу аналізу марківських систем високої розмірності. Метод повинен аналітично забезпечувати отримання в явному вигляді співвідношень, що визначають залежність, розподілу ймовірностей станів системи від чисельних значень параметрів цієї системи. **Завдання:** Розглянути задачу аналізу марківських систем високої розмірності з великим числом можливих станів. Запропонувати декомпозиційну обчислювальну процедуру, яка використовує метод фазового укрупнення станів системи. **Результати:** Розглянуто задачу аналізу марківських систем високої розмірності з великим числом можливих станів. Запропоновано декомпозиційну обчислювальну процедуру, яка використовує метод фазового укрупнення станів системи. **Висновки:** Запропонований метод дозволяє звести рішення початкової складної задачі до сукупності більш простих задач меншої розмірності. Метод забезпечує отримання аналітичних співвідношень, що визначають залежність розподілу ймовірностей станів системи довільної розмірності від чисельних значень її параметрів. Технологія вирішення задачі ілюструється рішенням двох прикладів.

**Ключові слова:** марківська система високої розмірності, метод декомпозиції системи, технологія реалізації обчислювальної процедури.

### Вступ

Для вирішення задач аналізу марківських систем традиційно використовується наступний підхід [1-3]. Вводиться математична модель функціонування системи на основі графа станів системи і множини можливих переходів з одних станів в інші. При цьому формується система лінійних алгебраїчних рівнянь А.Н. Колмогорова, рішення якої визначає залежність розподілу ймовірностей станів системи від чисельних значень її параметрів.

При отриманні чисельного рішення задачі жорстких обмежень на її розмірність не вводиться. Однак, аналітичне рішення цього завдання може бути отримано лише для задач порівняно невисокою розмірності (число можливих станів має порядок 8-10) [4, 5]. Ця обставина серйозно ускладнює вирішення задач аналізу систем реальної розмірності [6]. У зв'язку з цим виникає потреба в розробці технології вирішення задач аналізу марківських систем, розмірність яких перевищує гранично можливу для отримання необхідних співвідношень «вручну».

Крім того, слід зазначити, що вирішення цієї проблеми не просто бажано, але необхідно для задач прогнозування та управління марківськими системами [7,8].

Звідси випливає МЕТА дослідження: розробка спеціального методу аналізу марківських систем високої розмірності. Метод повинен аналітично забезпечувати отримання в явному вигляді співвідношень, що визначають залежність, розподілу ймовірностей станів системи від чисельних значень параметрів цієї системи.

### Постановка задачі

Введемо двухпоточну, одноканальну марківську систему з пріоритетом першого потоку перед заявками другого потоку. Пріоритет реалізується в такий спосіб. Заявка з першого потоку отримує від-

мову тільки в тому випадку якщо канал зайнятий обслуговуванням заявок цього ж потоку. Якщо в момент надходження заявки з першого потоку канал обслуговує заявку другого потоку, то ця заявка перевертеться в буфер. Заявка з другого потоку отримує відмову, якщо канал зайнятий обслуговуванням будь-якої заявки. Відповідний граф станів і переходів наведено на рис. 1, де  $\lambda_i$  – інтенсивність заявок  $i$ -го потоку;  $\mu_i$  – інтенсивність обслуговування заявок  $i$ -го потоку,  $i=1,2$ .

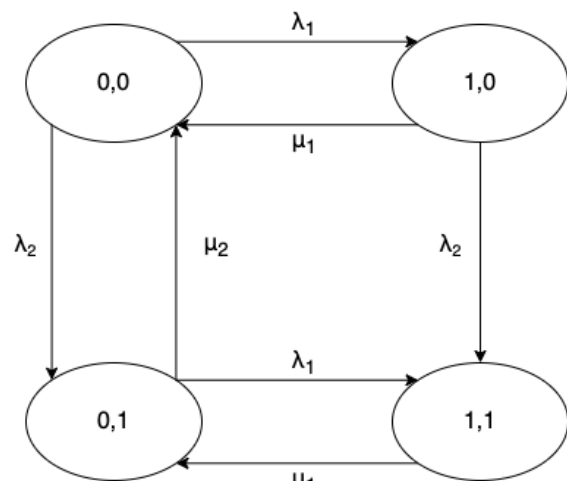


Рис 1. Граф станів і переходів системи

Згідно з цим графом введемо систему рівнянь Колмогорова щодо станів системи.

$$\begin{cases} \mu_1\pi_{10} + \mu_2\pi_{01} - \lambda_1\pi_{00} - \lambda_2\pi_{00} = 0; \\ \lambda_1\pi_{00} - \mu_1\pi_{10} - \lambda_2\pi_{10} = 0; \\ \lambda_2\pi_{00} + \mu_1\pi_{11} - \lambda_1\pi_{01} - \mu_2\pi_{01} = 0; \\ \pi_{00} + \pi_{01} + \pi_{10} + \pi_{11} = 1. \end{cases}$$

Після приведення подібних членів і їх упорядкування ця система набуває вигляду:

$$\begin{aligned} (\lambda_1 + \lambda_2)\pi_{00} - \mu_2\pi_{01} - \mu_1\pi_{10} &= 0; \\ \lambda_1\pi_{00} - (\mu_1 + \lambda_2)\pi_{10} &= 0; \\ \lambda_2\pi_{00} - (\lambda_1 + \mu_2)\pi_{01} + \mu_1\pi_{11} &= 0; \\ \pi_{00} + \pi_{01} + \pi_{10} + \pi_{11} &= 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Отримаємо рішення цієї системи за правилом Крамера.

$$\pi_{ij} = \frac{\det A_{ij}}{\det A} = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta}; i=0,1; j=0,1, \quad (2)$$

де  $\det A$  – визначник матриці коефіцієнтів системи (1),  $\det A_{ij}$  – визначник матриці коефіцієнтів, що виходить після заміни стовпця  $(i,j)$  стовпцем вільних членів.

Зрозуміло, що чисельне рішення системи рівнянь (1) для будь-якого набору вихідних даних ніяких труднощів не викликає. Але чисельного рішення недостатньо в задачах управління системою, коли необхідний набір аналітичних співвідношень, що зв'язують значення параметрів системи з розподілом ймовірностей її станів.

Перейдемо до вирішення цього завдання.

Маємо

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\mu_2 & -\mu_1 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ \lambda_2 & -(\lambda_1 + \mu_2) & 0 & \mu_1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Далі

$$\begin{aligned} \Delta_{00} &= \det A_{00} = \\ &= \det \begin{pmatrix} 0 & -\mu_2 & -\mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) & 0 & \mu_1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= -\det \begin{pmatrix} -\mu_2 & -\mu_1 & 0 \\ 0 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ -(\lambda_1 + \mu_2) & 0 & \mu_1 \end{pmatrix} = \\ &= -\mu_1(\mu_1\mu_2 + \mu_2\lambda_2) = \\ &= -\mu_1^2\mu_2 - \lambda_2\mu_1\mu_2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{01} &= \det A_{01} = \\ &= \det \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & 0 & -\mu_1 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ \lambda_2 & 0 & 0 & \mu_1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= -\det \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\mu_1 & 0 \\ \lambda_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ \lambda_2 & 0 & \mu_1 \end{pmatrix} = \\ &= \mu_1 [ -(\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 + \lambda_2) + \lambda_1\mu_1 ] = \\ &= -\mu_1\lambda_1\lambda_2 - \mu_1^2\lambda_2 - \mu_1\lambda_2^2; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta_{10} = \det A_{10} =$$

$$= \det \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\mu_2 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & -(\lambda_1 + \mu_2) & 0 & \mu_1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \quad (5)$$

$$= -\det \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\mu_2 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & -(\lambda_1 + \mu_2) & \mu_1 \end{pmatrix} =$$

$$= -\mu_1\lambda_1\mu_2 < 0;$$

$$\Delta_{11} = \det A_{11} =$$

$$\begin{aligned} &= \det \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\mu_2 & -\mu_1 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ \lambda_2 & -(\lambda_1 + \mu_2) & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= -\det \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\mu_2 & -\mu_1 \\ \lambda_1 & 0 & -(\mu_1 + \lambda_2) \\ \lambda_2 & -(\lambda_1 + \mu_2) & 0 \end{pmatrix} = \\ &= -\lambda_1^2\mu_1 - \lambda_1^2\lambda_2 - \lambda_1\mu_1\mu_2 - \lambda_1\lambda_2\mu_2 - \\ &= -\lambda_1\lambda_2\mu_1 - \lambda_1\lambda_2^2 - \lambda_2\mu_1\mu_2 - \lambda_2^2\mu_2 + \\ &+ \lambda_1^2\mu_1 + \lambda_1\mu_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1\mu_2 + \lambda_2^2\mu_2 = \\ &= -\lambda_1^2\lambda_2 - \lambda_1\lambda_2\mu_2 - \lambda_1\lambda_2\mu_1 - \lambda_1\lambda_2^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Тепер, так як

$$\begin{aligned} \pi_{00} + \pi_{01} + \pi_{10} + \pi_{11} &= \\ &= \frac{\Delta_{00}}{\Delta} + \frac{\Delta_{01}}{\Delta} + \frac{\Delta_{10}}{\Delta} + \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = \\ &= \frac{1}{\Delta}(\Delta_{00} + \Delta_{01} + \Delta_{10} + \Delta_{11}) = 1, \end{aligned}$$

то

$$\Delta = \Delta_{00} + \Delta_{01} + \Delta_{10} + \Delta_{11}.$$

Тоді (2) перетвориться до виду:

$$\pi_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta_{00} + \Delta_{01} + \Delta_{10} + \Delta_{11}}, \quad (7)$$

$$i=0;1; \quad j=0;1.$$

Знайдемо вираз для вирішення  $\Delta$ . Маємо:

$$\begin{aligned} \Delta &= -[ \mu_1^2\mu_2 + \lambda_2\mu_1\mu_2 + \mu_1\lambda_1\lambda_2 - \\ &= -\mu_1^2\lambda_2 - \mu_1\lambda_2^2 + \mu_1\lambda_1\mu_2 + \lambda_1^2\lambda_2 - \\ &= -\lambda_1\lambda_2\mu_2 - \lambda_1\lambda_2\mu_1 - \lambda_1\lambda_2^2 ]. \end{aligned} \quad (8)$$

Підстановка (3-6), (8) в (7) дає шуканий розподіл ймовірностей станів.

Перевіримо правильність отриманих співвідношень, порівнявши їх з відомими результатами для природних окремих випадків.

Випадок 1. Нехай  $\lambda_2 = 0$ . При цьому початкова двопотокова зводиться до однопотокової. Маємо

$$\begin{aligned}\pi_{00} &= \frac{\Delta_{00}}{\Delta} = \frac{\Delta_{00}}{\mu_1^2 \mu_2 + \mu_1 \mu_2 \lambda_1} = \\ &= \frac{\mu_1 \mu_1 \mu_2}{\mu_1 \mu_2 (\mu_1 + \lambda_1)} = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \lambda_1}; \\ \pi_{01} &= \frac{\Delta_{01}}{\Delta} = 0; \\ \pi_{10} &= \frac{\Delta_{10}}{\Delta} = \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2 (\mu_1 + \lambda_1)} = \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \lambda_1}; \\ \pi_{11} &= \pi_{11} = 0\end{aligned}$$

Випадок 2. Нехай  $\lambda_1 = 0$ . При цьому система також спрощується до однопотокової. Маємо

$$\begin{aligned}\pi_{00} &= \\ &= \frac{\mu_1^2 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1 \mu_2}{\mu_1^2 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1 \mu_2 + \mu_1^2 \lambda_2 - \mu_1 \lambda_2^2} = \\ &= \frac{\mu_1 \mu_2 (\mu_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 (\mu_1 + \lambda_2) + \mu_1 \lambda_2 (\mu_1 + \lambda_2)} = \\ &= \frac{\mu_2}{\mu_2 + \lambda_2}; \\ \pi_{01} &= \frac{\Delta_{01}}{\Delta} = \\ &= \frac{\mu_1^2 \lambda_2 + \mu_1 \lambda_2^2}{\mu_1^2 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1 \mu_2 + \mu_1^2 \lambda_2 + \mu_1 \lambda_2^2} = \\ &= \frac{\mu_1 \lambda_2 (\mu_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 (\mu_1 + \lambda_2) + \mu_1 \lambda_2 (\mu_1 + \lambda_2)} = \frac{\lambda_2}{\mu_2 + \lambda_2}; \\ \pi_{10} &= \pi_{11} = 0.\end{aligned}$$

Отримані результати, як і слід було очікувати, збігаються з відомими, обумовленими класичними формулами Ерланга.

Наведемо тепер приклад більш складного завдання, в якій отримання шуканого розподілу ймовірностей станів з використанням стандартних методів розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь аналітично важко піддається реалізації.

Розглянемо три-потокову одноканальну марківську систему з ієрархічними пріоритетами. Нехай на вхід системи надходить суперпозиція трьох потоків з інтенсивностями відповідно рівними  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ . При цьому перший потік має пріоритет перед другим і третім потоками, а другий потік - перед третім. Інтенсивності обслуговування заявок цих потоків рівні  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ .

Пріоритети одних заявок перед іншими проявляються наступним чином.

Заявка з першого потоку приймається до обслуговування, якщо канал не зайнятий обслуговуванням заявок цього ж потоку. Якщо в момент надходження заявок першого потоку канал обслуговує заявку з другого або третього потоків, то обслуговування цих заявок переривається, і вони переводяться в буфер, де чекають моменту звільнення каналу.

Заявки з другого потоку приймаються до обслуговування, якщо канал не зайнятий обслуговуванням заявок першого або другого потоку. Якщо в момент надходження заявок другого потоку канал обслуговує заявку першого потоку, то заявка яка надійшла переводиться в буфер. Якщо в момент надходження заявок другого потоку канал обслуговує заявку з третього потоку, то ця обслуговувана заявка переводиться в буфер, де чекає моменту звільнення каналу.

Граф станів і переходів, що описують поведінку такої системи обслуговування, має вигляд, представлений на рис 2.

Запишемо систему рівнянь Колмогорова щодо ймовірностей станів системи.

Введемо набір ймовірностей станів системи.

$\pi_{000}$  – канал вільний, буфер вільний;

$\pi_{100}$  – канал зайнятий обслуговуванням заявки з першого потоку, буфер вільний;

$\pi_{010}$  – канал зайнятий обслуговуванням заявки з другого потоку, буфер вільний;

$\pi_{001}$  – канал зайнятий обслуговуванням заявки з третього потоку, буфер вільний;

$\pi_{110}$  – канал зайнятий обслуговуванням заявки з першого потоку, в буфері заявка другого потоку;

$\pi_{011}$  – канал зайнятий обслуговуванням заявки з другого потоку, в буфері заявка третього потоку;

$\pi_{101}$  – канал зайнятий обслуговуванням заявки з першого потоку, в буфері заявка третього потоку;

$\pi_{111}$  – канал зайнятий обслуговуванням заявки з першого потоку, в буфері заявки другого і третього потоку;

Система рівнянь Колмогорова має вигляд:

$$\begin{aligned}\mu_1 \pi_{000} + \mu_2 \pi_{010} + \mu_3 \pi_{001} - \\ - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \pi_{000} &= 0; \\ \lambda_1 \pi_{000} - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \pi_{100} &= 0; \\ \lambda_2 \pi_{000} + \mu_1 \pi_{100} - (\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_3) \pi_{010} &= 0; \\ \lambda_1 \pi_{010} + \lambda_2 \pi_{100} - (\mu_1 + \lambda_3) \pi_{110} &= 0; \\ \lambda_3 \pi_{000} + \mu_1 \pi_{101} + \mu_2 \pi_{011} - \\ - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3) \pi_{001} &= 0; \\ \lambda_1 \pi_{000} + \lambda_3 \pi_{100} - (\mu_1 + \lambda_2) \pi_{101} &= 0; \\ \lambda_2 \pi_{001} + \lambda_3 \pi_{010} + \mu_1 \pi_{111} - \\ - (\lambda_1 + \mu_2) \pi_{011} &= 0; \\ \lambda_1 \pi_{011} + \lambda_2 \pi_{001} + \lambda_3 \pi_{101} - \mu_1 \pi_{111} &= 0.\end{aligned}\tag{9}$$

Для вирішення отриманої системи лінійних алгебраїчних рівнянь використовуємо декомпозиційну процедуру.

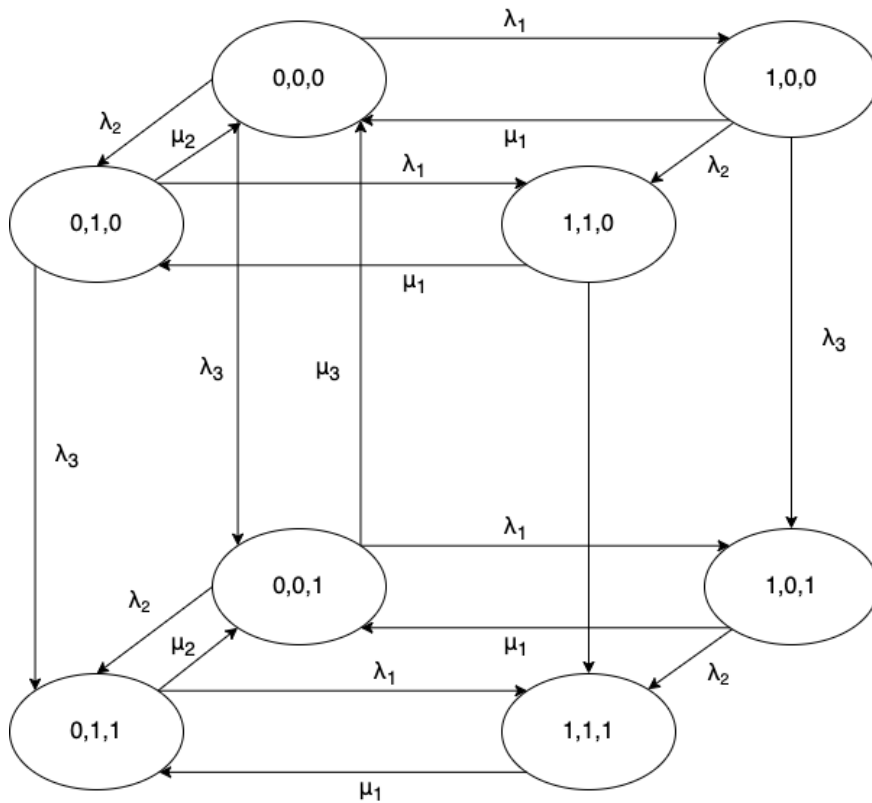


Рис 2. Граф станів і переходів трьохпотокової одноканалної системи з ієрархіческими пріоритетами.

Суть цього підходу полягає в наступному. Вся множина станів системи розбивається на підмножини. Обчислювальна процедура вирішення задачі розрахунку розподілу ймовірностей станів є трьохетапною.

На першому етапі для кожного підмножини станів незалежно відшукується умовний розподіл ймовірностей станів (за умови відсутності переходів з одних підмножин в інші підмножини).

На другому етапі стани кожного з підмножин «укрупнюються». Тепер для кожної пари підмножин («укрупнених» станів) розраховуються ймовірності переходів між ними, з використанням яких визначається розподіл ймовірностей перебування системи на множині «укрупнених» станів. На третьому етапі здійснюється розрахунок безумовних ймовірностей станів початкової системи.

Відзначимо, що будь-який варіант декомпозиції системи спрощує процедуру її аналізу, оскільки зводить початкову складну задачу до сукупності більш простих. Однак, в розглянутій задачі можна виявити той з цих варіантів, який забезпечує отримання максимально швидкого вирішення. Цей варіант відповідає наступному розбиття вихідного множини: підмножина  $E_0 = \{(000), (100), (010), (110)\}$  і підмножина  $E_1 = \{(001), (101), (011), (111)\}$ . Легко побачити, що структура переходів і їх ймовірності для станів підмножин  $E_0$  і  $E_1$  ідентичні. Звідси випливає, що умовні розподіли ймовірностей станів для «укрупнених» станів  $E_0$  і  $E_1$  також будуть збігатися.

Крім того, звернемо увагу на те, що структура переходів і їх ймовірності для станів підмножин  $E_0$  і  $E_1$  в точності відповідає структурі переходів і значенням їх ймовірностей в двопотоковій системі, розглянутій вище.

Таким чином, співвідношення (3) - (8) визначають умовні розподіли ймовірностей станів системи для підмножин  $E_0$  і  $E_1$ .

Ці обставини дозволяють при вирішенні завдання аналізу розглянутої трьох потокової системи відразу перейти до другого етапу.

Відповідно до цього введемо набори

$$(\hat{\pi}_{000}, \hat{\pi}_{100}, \hat{\pi}_{010}, \hat{\pi}_{110}),$$

$$(\hat{\pi}_{001}, \hat{\pi}_{101}, \hat{\pi}_{011}, \hat{\pi}_{111}),$$

що визначають умовні розподіли ймовірностей для «укрупнених» станів  $E_0$  і  $E_1$ . Далі розрахуємо інтенсивності переходів з  $E_0$  в  $E_1$ , а також з  $E_1$  в  $E_0$ . Маємо

$$\mu\left(\frac{E_1}{E_0}\right) = (\hat{\pi}_{000} + \hat{\pi}_{100} + \hat{\pi}_{010} + \hat{\pi}_{110})\lambda_3 = \lambda_3;$$

$$\mu\left(\frac{E_0}{E_1}\right) = \hat{\pi}_{001}\mu_3. \tag{10}$$

Тепер, на третьому етапі процедури визначимо безумовні ймовірності станів початкової системи. Відповідно до (10) ймовірності перебування системи в станах  $E_0$  і  $E_1$  відповідно рівні

$$P_{E_0} = \frac{\mu\left(\frac{E_0}{E_1}\right)}{\mu\left(\frac{E_0}{E_1}\right) + \mu\left(\frac{E_1}{E_0}\right)},$$

$$P_{E_1} = \frac{\mu\left(\frac{E_1}{E_0}\right)}{\mu\left(\frac{E_0}{E_1}\right) + \mu\left(\frac{E_1}{E_0}\right)}.$$
(11)

Тоді безумовні ймовірності станів системи визначаються формулами:

$$\begin{aligned}\pi_{000} &= \hat{\pi}_{000} P_{E_0}; \pi_{100} = \hat{\pi}_{100} P_{E_0}; \\ \pi_{010} &= \hat{\pi}_{010} P_{E_0}; \pi_{110} = \hat{\pi}_{110} P_{E_0}; \\ \pi_{001} &= \hat{\pi}_{001} P_{E_1}; \pi_{101} = \hat{\pi}_{101} P_{E_1}; \\ \pi_{011} &= \hat{\pi}_{011} P_{E_1}; \pi_{111} = \hat{\pi}_{111} P_{E_1};\end{aligned}$$

Рішення задачі завершено.

Таким чином, запропонована процедура декомпозиції множини станів шляхом їх фазового укрупнення забезпечує можливість аналізу марковських систем з великим числом станів. Реалізація цієї процедури знімає проблему, пов'язану з необхідністю вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь з великим числом змінних. При цьому ефективність методу зі збільшенням розмірності задачі зростає.

Можливий напрямок подальших досліджень пов'язаний з поширенням технології декомпозиції марківських систем на випадок, коли параметри системи задані нечітко [9] або неточно [10]. Можливі підходи до вирішення завдання в цій ситуації запропоновані в [11, 12].

### Висновки

1. Розглянуто задачу аналізу марківських систем з великим числом станів. Для вирішення завдання запропонована декомпозиційна процедура, заснована на фазовому укрупненні станів. Ця процедура зводить початкову складну задачу високої розмірності до вирішення послідовності задач меншої розмірності.

2. Ефективність запропонованого методу зі збільшенням розмірності системи зростає, що забезпечує можливість його успішного застосування, зокрема, для аналізу багатопотокових систем обслуговування зі складною ієрархією пріоритетів.

3. Запропонований метод аналізу систем високої розмірності дозволяє отримати аналітичні співвідношення, що описують залежність розподілу ймовірностей станів системи від чисельного значення її параметрів.

Ця обставина відкриває можливість застосування методу для вирішення завдань управління марківськими системами високої розмірності.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барича-Рид А. Элементы теории марковских процессов и их приложения. – М: Наука, 1963. – 406 с.
2. Сарымсаков Т. Основы теории процессов Маркова. – М: Гостехиздат, 1994. – 386 с.
3. Булинский А.В., Ширяев А.Н. Теория случайных процессов. – М: Физматлит, 2005. – 396 с.
4. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. – М: ЮНИТИ-ДАТА, 2004. – 312 с.
5. Дынкин Е.Б., Марковские процессы. – М: Наука, 1987. – 632 с.
6. Manhuig C.D., Schütze H. Foundations of statistical processing. – MIT Press, 1999. 264 p.
7. Ramage D., Hidden D. Markov models fundament. – Standard school of engineering, 2011. 194 p.
8. Алхимов В.И. Марковские модели в задачах статистики и прогнозирования. – М: ППУнивер, 2013. – 171 с.
9. Раскин Л.Г., Серая О.В. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения. – Х: Парус, 2008. – 352 с.
10. Pawlak Z., Hidden D. Rough sets. // International journal of information and computer sciences, 1982. – vol II, No 5. P. 341-356.
11. Raskin L., Sira O. Fuzzy models of rough mathematics // Eastern European journal of Enterprise Technologies, 2016. Vol 5, No 6. p. 53-60.
12. Raskin L., Sira O. Methods of solving fuzzy problem of mathematical programming // Eastern European journal of Enterprise Technologies, 2016 – vol 5, No 4. P. 23-28.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### The decomposition method for solving analysis problems of high dimensional Markov systems

L. Ruskin, O. Sira, R. Korsun

**Abstract.** The subject of the article is the decomposition computing procedure, which uses the method of phase system states enlargement. **The goal** is to develop a special method of analysis of high-dimensional Markov systems. The method should analytically provide obtaining explicit relations that determine the dependence of system state probabilities distribution on numerical values of system parameters. **Task:** Consider the problem of analyzing high-dimensional Markov systems with many possible states. Propose a decomposition computational procedure that uses the method of phase system states enlargement. **Results:** The analysis problem of high-dimensional Markov systems with a large number of possible states is considered. The decomposition computational procedure using the method of phase system states enlargement is proposed. **Conclusions:** The proposed method allows to reduce the solution of the initial complex problem to a set of simpler small dimension problems. The method is analytically provides obtaining explicit relations that determine the dependence of system state probabilities distribution on numerical values of system parameters. The technology solution for solving the problem is illustrated by two examples.

**Keywords:** high-dimensional markov system, system decomposition method, computing technology implementation procedure.



K. Rukkas, G. Zholtkevych

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

## LOAD BALANCING CONSISTENCY IN A DISTRIBUTED DATASTORE

**Abstract.** The **subject** of the article's research is the CAP-guarantees of distributed datastore, particularly availability and consistency. The **goal** is to design an approach that will become an instrument to balance consistency CAP-guarantee for any business needs still maintaining appropriate availability guarantee. The algorithm could be integrated to datastore infrastructure as one of distributed datastore components that must stand on top of or integrated in database middleware standing on the path to node database instance and actual query execution. To achieve that, the following problems were solved in the paper: the simulation models for approaches have been implemented, actual possibility to implement an algorithm following specific approach has been investigated. The following **methods** were used to implement such solutions: UML modeling, computer model implementing the simulation of the designed algorithms, carrying experiments on the implemented models. Carried out experiments **resulted in** capability to estimate the complexity and possible performance and make conclusions choosing one of optimal approaches to be designed further. As a **conclusion**, the optimal designed and estimated approach of balancing consistency and availability is ready and it was the purpose of this paper. It could be applied as one of basic components on the design distributed datastores stage, so that balanced guarantees of distributed system reliability could be achieved at the earlier stage of business needs implementation.

**Keywords:** CAP-guarantees, load balancing, distributed databases, high availability, strong consistency.

### Introduction

In modern times scaling technical software requires distributed systems it relies on to be resistant to node faults occurrence, fast enough response time and reasonable consistency reached on most of the distributed system nodes to avoid node conflicts. It is desired, the system must survive having any number of nodes in its infrastructure. In conditions of well-known CAP-theorem such requirements become hard to achieve. The current paper is devoted to the research of how the CAP-characteristics could be balanced to fulfill these needs. This could result in lots of opportunities: reaching needed value of consistency, maintaining reasonable value of availability, monitoring the consistency and availability current state of the system, and even achieving strict consistency in good enough network conditions.

**Literature analysis and background.** While designing any software architecture there is a need to make a choice: ACID or BASE model, that means strong consistency that results in weaker availability or basically available eventually consistent system where strong consistency is neglected. The comparing analysis for these models were made in [1]. It is reasonable solution for some business requirements, when, for example, the system has small number of nodes in its infrastructure, eventually consistency is achieved quickly and strong consistency is not important in such case. Or when database partitioning is settled and every dataunit can be found only on one node and replication is not needed. But for large distributed datastore with replication it is important somehow to achieve the best value of consistency and not to deteriorate availability and partition tolerance guarantees. Also, it is essential to keep track on these guarantees while system is working. CAP-guarantees had been deeply researched since the well-known CAP-theorem had been officially proven [2] and discussed 12 years later [3]. Some work had been done for consistency improvements that can tend to strict consistency [4]. But in this paper, the through-

put is calculated only for number of nodes up to 16. Large systems were not considered in this work.

**Background.** In this paper we explore load balancing solutions to investigate the ability to balance across only consistent nodes that supports one or another dataunit. We are convinced that strong consistency or eventual consistency, that converges fast, could be achieved without losing availability since most of distributed system use epidemic algorithms to broadcast replicas (see [5], [6]) and the broadcasting can be faster than consistency disbalancing. For that we explore works for database load balancers ([7], [8]) and the possibility to contribute to existing load balancers to maintain the idea mentioned above. All existing load balancers for databases support well-known balancer algorithm like Round Robin, Least Connections etc. (see [7], [8]). One of the components in some of solutions, implemented in the paper, is load balancer dynamic API [9], [10]. This application allows some features, partially, can return the list of currently health checked nodes. Also, we need to mention that databases have parsers that allow parse database request [11] and there are many optimizations, like Microsoft has done, for example, in [12] and official doc is presented in [13]. Additionally, many of databases support caching compiled queries [14]. The last that we would like to mention is our previous paper [15], where we form the mathematical model with metrics for CAP-guarantees.

### Core Material

Load balancing is the technique, that allows distributing requests between application instances or network devices where this application live. The purpose lies in optimization of resources usage, saving response time and providing system fault tolerance. The load balancing can be applied in different needs depending of system requirements and the desired result and there are also balancers for various database solutions [7]. A big problem in existing solutions is that data on nodes have to be the same. So there is no partitioning dataunits on different sets of servers. But some of the load balancers,

mentioned in [7], are opensource and algorithms for requests balancing technique can be enhanced or new algorithms are embedded. In this paper we investigate and estimate this ability in terms of imitation modeling.

In the paper we go deep into the research for the tradeoff of consistency and availability using load balancing algorithms enhancement. These algorithms are based on the idea to balance only across consistent nodes that have the given dataunit and on the idea that spreading replica is fast enough to maintain list of consistent nodes as big enough as needed. The several solutions has been explored:

1) load balancer custom algorithm (that may be contributed to opensource, so that needed solution is maintained);

2) hybrid balancing solution on the level of custom balancing algorithm that can be contributed to one of balancers solutions and some applications that are implemented in purpose to replace those features load balancer never supports;

3) own balancer database middleware component, that balances consistent nodes without any general load balancing features.

In this section we introduce these solutions in terms of class and sequence diagrams below and estimate effectiveness of each solution and discover pros and cons and perspectives of solutions.

Let us firstly describe main components that will be used in the approaches:

- Node object is a structure that contains the unique identifier of node (like host or IP-address), the time of last update and may be some other additional info that can be used for request forwarding (used in all represented approaches below)

- CNode hash table is the global mapping that each dataunit (as a key) associates with a binary tree of consistent Node objects that store given dataunit (used in all represented approaches below)

- DNode hash table is the global mapping that each dataunit (as a key) associates with a binary tree of Node objects that store given dataunit (used in all represented approaches below). This table will not be changed dynamically, only if the requirement to add new dataunits appears. But this case is another story and the separate interface can be simply implemented for that.

- Request is the request object that enhances general database request object may represent if it is write or read request, may contain the flag that identifies if it is forwarded from another node and the flag identifying if the given request is replica or request itself broadcasted.

- Load Balancer Dynamic API that allows to make some requests to Load Balancer. Here the ability to get the list of current nodes that can accept requests will be used.

*Load Balancer Algorithm Enhancement.* The first solution comes up with custom balancer algorithm that can be embedded into existing load balancer solution and enhance some opensource solution. We present a class and sequence diagrams (see Fig. 1 – Fig. 3). The class diagram shows that the solution is based on existing load balancer algorithm implementation (for exam-

ple, on Round Robin to be more intuitive) and enhance this algorithm by replacing the node list that request can be forwarded to.

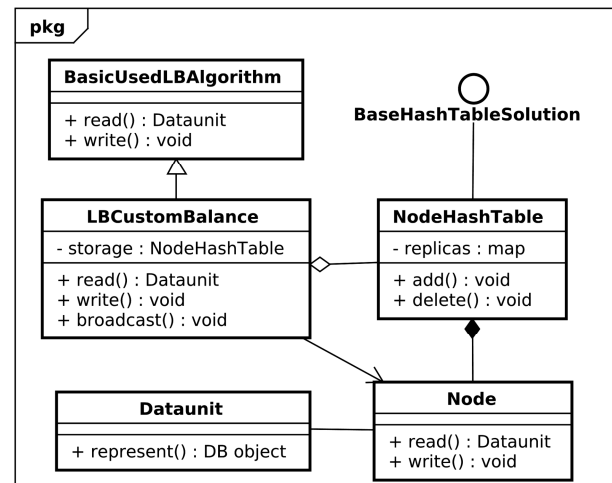


Fig. 1. Custom Load Balancer class diagram

The node list is based on mapping that associates each data unit to the list of *consistent* nodes that store it. Nodes are consistent in terms of that they have the up-to-date latest replica version. So once a write request came the association for this dataunit is updated with a new node set, the first node that actually changed own replica. That time all other nodes become inconsistent and with every broadcast the map of dataunits and nodes is growing again until the next write request. Our purpose in this paper was to find the ratio of number of nodes that store a dataunit to the amount of write requests. This would allow to show that during distributed database lifetime there are enough of consistent nodes that are able to maintain desirable availability. Basing on these structural and behavioral diagrams we created the imitation model that allows to execute experiments on simulated solution components. In the model a user can regulate the threshold that is the minimum amount of nodes that must respond at any moment of system lifetime.

Later we introduce the results of these executions as graphics with dataunits as abscissa axis and number of nodes that maintain a dataunit as axis of the ordinates. These experiments is run on 100, 1000, 5000 write requests for hundreds of nodes in a datastore for every approach presented in the paper. We emphasize that in this solution the load balancing algorithm itself is responsible for broadcasting the replicas across a datastore and interact with hash map, where the key is dataunit hash and the value is the list of consistent nodes that contains given dataunit and another hash map that differs only with the value of list of all nodes that contains given dataunit. This algorithm has pretty simple architecture to solve inconsistency problem.

But it has a lot of future problems related to the fact that algorithms of load balancers should solve completely other problems, such as, fault tolerance, health of the system etc. and it is not essentially to enhance these algorithms like that.

*Hybrid Load Balancing.* This solution still enhances general load balancer algorithms implementa-

tions, but built with the purpose of not additional responsibility put on load balancer algorithm itself. For that load balancer API is designed that should interact with load balancer algorithm and change the node hash table adding new nodes to a list for a dataunit or remove them once new request came.

So that load balancing algorithm just needs to interact with existing node hash table on every request to make decision on the list of nodes where a request can be forwarded. See the solution class diagram in Fig. 2.

So that current approach still has to implement custom algorithm that can inherit some of existing algorithms, but from point of architecture view it is still better than previous solution because the responsibility of filling the CNode Hash Table that the balancer should not definitely be responsible for is put on the separate API.

*Own balancer solution.* And finally, we want to introduce balancer approach that shall not touch the load balancer algorithms implementations at all. In this solution general load balancer is still used to maintain fault tolerance. This solution is a more complex one, so for that we need to introduce class diagram along with algorithm for write and read request cases. You can see class diagram in Fig. 3 and block schemas for read and write database requests in Fig. 4 and in Fig. 5.

Thus, now we can say that this approach have some specialties:

- it does not change the initial load balancer architecture and does not enhance its responsibility that cause load balancer to remain still essential mechanism to do; the application that stands on front of the database and can be understood as one of the database middleware, should understand request incoming to get a dataunit requested. Therefore this operation will depend on database implementation and optimization that is made to improve this part of functionality. Other operations will take:  $O(\log n)$  on taking the nodes from a hash table and respond or  $O(\log n)$  plus one more algorithm repeat when request came to the node that does not store given dataunit taking into account the operations to take fault tolerant nodes from dynamic load balancer api and intersect them, which will take  $O(1)$  as some constant time will be wasted and  $O(n)$  for each operation appropriately. So that in the worst case it will be  $O(\log n) + O(1) + O(n) + O(\log n) + O(1)$ . Calculating this expression we get  $O(n)$  time complexity.

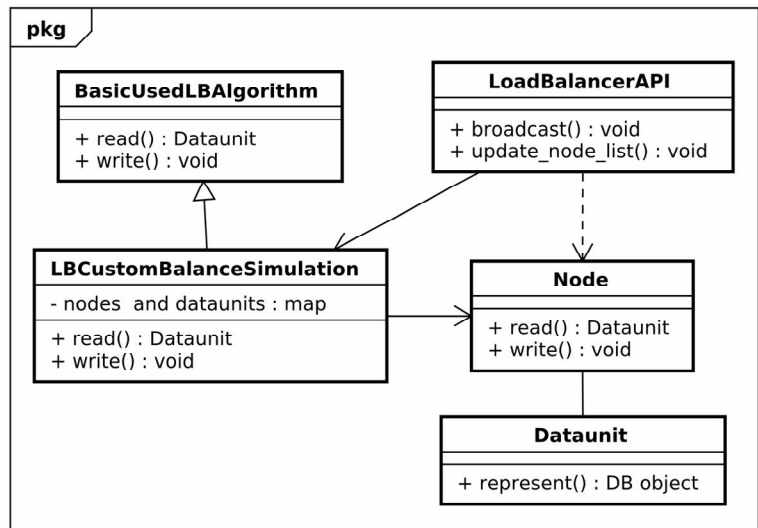


Fig. 2. Hybrid Load Balancer class diagram

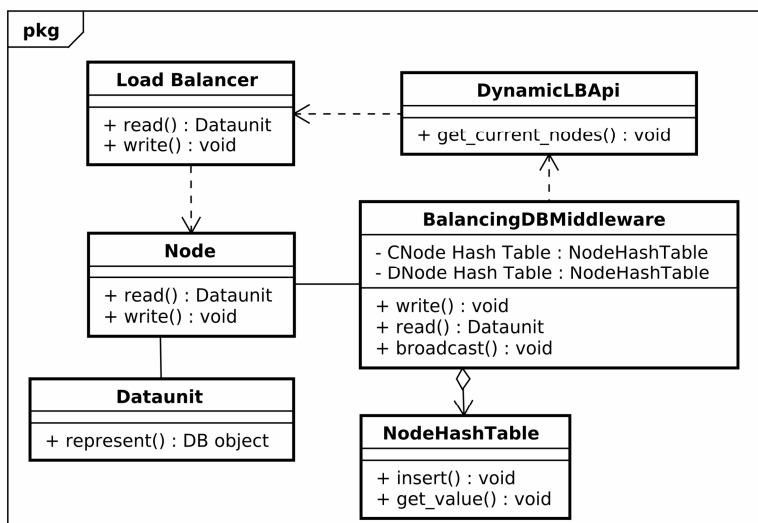


Fig. 3. Database Load Balancer Class Diagram

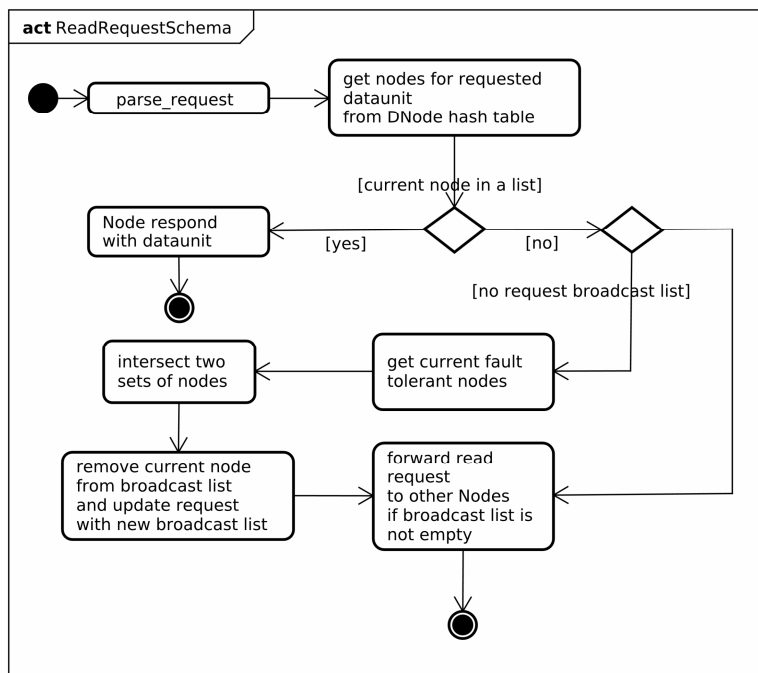


Fig. 2. Read request activity diagram for Load Balancing

Space complexity in the worst case will be  $O(n)$ , because at maximum  $n$  nodes will be in memory at a time;

– basically, two other load balancer algorithms will have similar complexity since they will need to parse database request to make decision on what dataunit is requested and what nodes will be chosen to forward. Also, it shows the problems that can appear on load balancer side, when it will need to deal with database request somehow and it is not what it is designed for initially at all. In these terms the current approach should suit better in the architecture point of view, because database side is already optimized for understanding database queries and a lot of solutions for this already exist in a box.

*Case study.* So since the simulation models for three of approaches have been implemented, we executed the set of experiments on these models in the conditions of 500 nodes in the network, 100 dataunits distributed across them at random and different number of write and read requests. The executions were run for: writes and reads, for both cases, when writes occur more often, and opposite cases, when reads occur more frequently than writes. All the simulation models have availability threshold that is a number of nodes that should stay available for any dataunit. The graphics represent the dataunits as axis and number of consistent nodes that stay consistent. In some graphics we can see the number of consistent nodes that can answer rarely reaches threshold, that means that sometimes the number of consistent nodes is less than threshold set as 30 nodes.

The solutions can be compared with the frequency of that number of consistent nodes outreaches the set

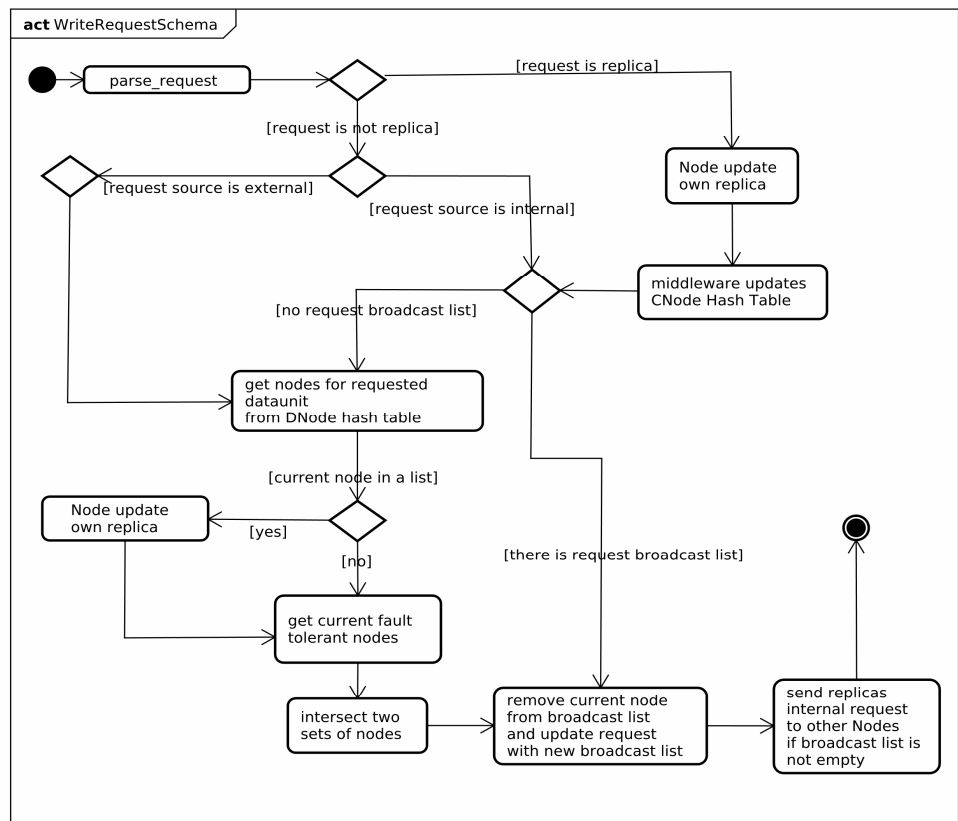


Fig. 3. Write Request activity diagram for Load Balancing

limit. Look at the results of first approach simulation (custom load balancer algorithm) in Fig. 6 – Fig. 9. These figures represents the experiments run on small amount of writes and reads and on large quantity of read and write requests in order to show the way performance of algorithm changes.

The second set of figures (Fig. 10 – Fig. 13) represents results for custom algorithm with additional API for the same numbers of writes and reads. As it can be seen, this algorithm has extremely bad performance on large amount of requests as for both of the cases when write or read requests prevail. This makes implementation of this solution harder and not survivable for the real business needs.

Let's consider the last approach that simulation model and algorithm is implemented for. Look at the figures (Fig. 14 – Fig. 17) representing the state of our simulated system that experiments were run in conditions of the same amount of read and write requests. At the pictures we can clearly see that custom load balancer algorithm has best performance in the simulation.

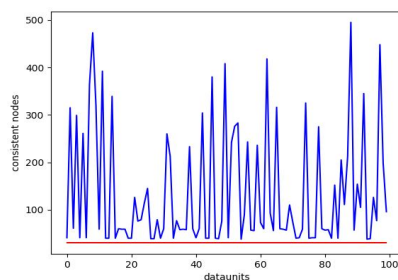


Fig. 4. Custom algorithm: 100 writes and 66 reads

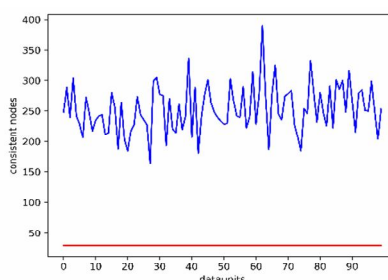


Fig. 5. Custom algorithm: 5000 writes and 3333 reads

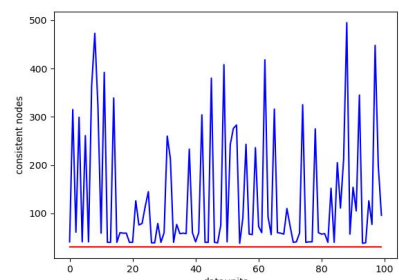
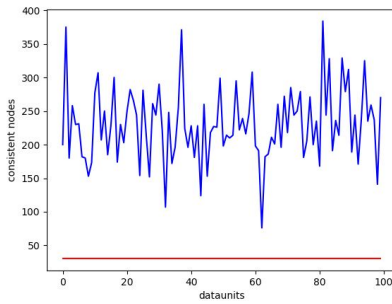
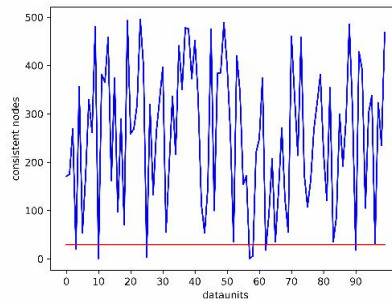


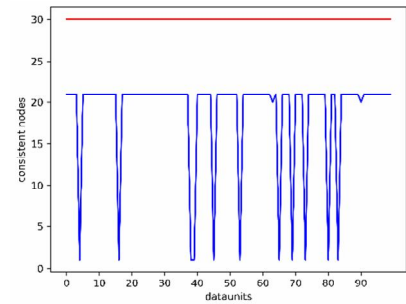
Fig. 6. Custom algorithm: 100 writes and 150 reads



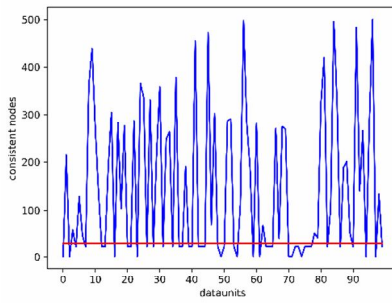
**Fig. 7.** Custom algorithm: 5000 writes and 7500 reads



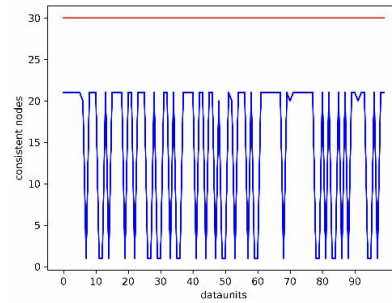
**Fig. 8.** Custom algorithm with API: 100 writes and 66 reads



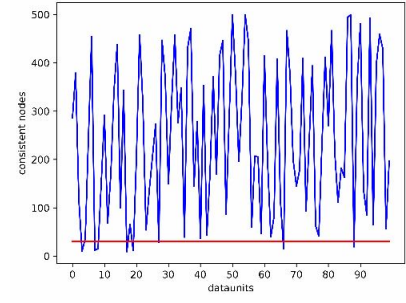
**Fig. 9.** Custom algorithm with API: 5000 writes and 3333 reads



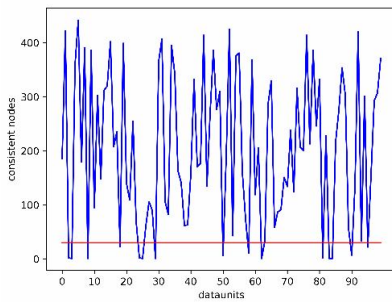
**Fig. 10.** Custom algorithm with API: 100 writes and 150 reads



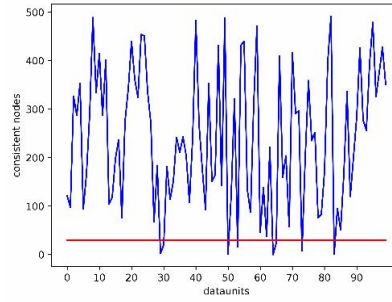
**Fig. 11.** Custom algorithm with API: 5000 writes and 7500 reads



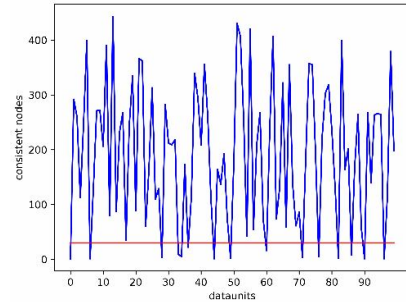
**Fig. 12.** Own balancing. 100 writes and 66 reads



**Fig. 13.** Own balancing. 5000 writes and 3333 reads



**Fig. 14.** Own balancing. 100 writes and 150 reads



**Fig. 15.** Own balancing. 5000 writes and 7500 reads

But during implementation of this algorithm the following problems will appear and slow down performance:

- load balancer needs to know what dataunit is requested and needs to parse somehow the database request. It is not related to load balancer features and what it is designed for, so that it meets all the issues that databases had while optimizing parsers
- different databases have already implemented algorithms to parse the request and optimized them. Therefore, database has some options when understanding a request and some databases supports parsing a request partially, only a dataunit, for example, so that it will speed up the performance at the database side in compare with load balancer side solution
- load balancer will need to parse database request partially, but still database will need to parse the request again to execute the query.

These conclusions mean that the third approach is optimal after understanding some design details and limitations. The third approach has still good performance, a little bit worse, that the first one. But it can be clear that after implementation of these algorithm the first approach performance will be significantly decreased, because

parsing of database request is not the load balancer problem. Thus, the database request will be parsed twice: at load balancer side to get a requested dataunit and database side: to execute the query. So that, the first approach loses in design complexity and impossibility to meet further issues. Also, we do not consider the second approach anymore since it has the worst performance of the algorithm. For now, the optimal solution is the third approach which is own load balancer as database middleware at the side of every node. For now, we have already tried to avoid some issues to be met, such as, selecting broadcast list in every request that will avoid flooding other with requests, optimizing number of requests to dynamic API of load balancer, removing current node from broadcast list to avoid cycling, replicas version implemented as timestamps to avoid conflicts.

### Conclusions

The purpose of the current work was the formation of algorithm that will improve CAP-guarantees or balance them for specific business requirements. In order to achieve it three approaches were designed, investigated, compared and estimated using simulation computer model. During algorithm design all the inves-



tigated approaches have already shown their weaknesses and advantages and allowed to choose one of solutions basing on best practices analyzing technical weaknesses of every solution. As a result, when designing new software with distributed datastore or integrating dis-

tributed database with existing software, the architect could use the recommended algorithm as a distributed database middleware component so that there could be found the trade-off for CAP-guarantees that is necessary for specific software requirements.

## REFERENCES

1. Banothu, N., Bhukya, S. and Sharma, K. (2016). Big-data: Acid versus base for database transactions. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/7755401>.
2. Gilbert, S. and Lynch, N. (2002). Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services. ACM SIGACT News, 33(2), p.51, available at <https://users.ece.cmu.edu/~adrian/731-sp04/readings/GL-cap.pdf>.
3. Brewer, E. (2012). CAP twelve years later: How the "rules" have changed. Computer, 45(2), pp.23-29, available at <https://www.infoq.com/articles/cap-twelve-years-later-how-the-rules-have-changed/>.
4. Calder, B., Simitci, H., Haridas, J., Uddaraju, C., Khatri, H., Edwards, A., Bedekar, V., Mainali, S., Abbasi, R., Agarwal, A., Haq, M., Wang, J., Haq, M., Bhardwaj, D., Dayanand, S., Adusumilli, A., McNett, M., Sankaran, S., Manivannan, K., Rigas, L., Ogus, A., Nilakantan, N., Skjolsvold, A., McKelvie, S., Xu, Y., Srivastav, S. and Wu, J. (2011). Windows Azure Storage: a highly available cloud storage service with strong consistency. Proc. of the Twenty-Third ACM Symposium on Operating Systems Principles - SOSP '11, available at <http://web.eecs.umich.edu/~mozafari/winter2014/eecs684/papers/azure.pdf>.
5. Burmester, M., Le, T. and Yasinsac, A. (2007). Adaptive gossip protocols: Managing security and redundancy in dense ad hoc networks. Ad Hoc Networks, 5(3), pp.313-323, available at <http://www.cs.fsu.edu/~burmeste/adhocjournal.pdf>.
6. Haas, Z., Halpern, J. and Li Li (2002). Gossip-based ad hoc routing. Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 3, pp.1707-1716, available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/1019424>.
7. Veerman, G., Breuk, R., 2012. Database Load Balancing, Mysql 5.5 Vs Postgresql 9. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam, System & Network Engineering, [https://www.os3.nl/media/2011-2012/courses/ia/roxy\\_breuk\\_gerie\\_veerman\\_report.pdf](https://www.os3.nl/media/2011-2012/courses/ia/roxy_breuk_gerie_veerman_report.pdf).
8. Joshi, S., Ameta, S., & Lavania, G. (2019). Balanced Load in Distributed System with NoSQL Middleware. International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (www.jetir.org), 6(5), pp.133-137, available at <https://pdfs.semanticscholar.org/f6fd/7e1c441040ae0a022cb19d930df1ef9bd07b.pdf>.
9. Mhedhbi, M., 2017. Dynamic Configuration With The Haproxy Runtime API – Haproxy Technologies. [online] HAProxy Technologies, available at <https://www.haproxy.com/blog/dynamic-configuration-haproxy-runtime-api>.
10. Dynamic Configuration Of Upstreams With The NGINX Plus API - NGINX Documentation. n.d. NGINX Docs [online], available at <https://docs.nginx.com/nginx/admin-guide/load-balancer/dynamic-configuration-api>.
11. Zelle, J.M., Mooney, R.J. (1996). Learning to Parse Database Queries Using Inductive Logic Programming. AAAI/IAAI, 2, pp. 1050-1055, available at <https://pdfs.semanticscholar.org/1c9d/f99cce1903d34c53025e86e72331bbf8e08f.pdf>.
12. Chen, X., Fang, H., Lin, T., Vedantam, R., Gupta, S., Dollár, P., Zitnick, C.L. (2015). Microsoft COCO Captions: Data Collection and Evaluation Server. ArXiv, abs/1504.00325, available at <https://arxiv.org/pdf/1504.00325.pdf>.
13. 2019, Optimize Cost And RU/S To Run Queries In Azure Cosmos DB – docs.microsoft.com [online], available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/cosmos-db/optimize-cost-queries>.
14. Patterson, R., Gibson, G., Ginting, E., Stodolsky, D. and Zelenka, J., 1995. Informed prefetching and caching. Proceedings of the fifteenth ACM symposium on Operating systems principles - SOSP '95, available at [http://www.cs.columbia.edu/~nieh/teaching/e6118\\_s00/papers/p79-patterson.pdf](http://www.cs.columbia.edu/~nieh/teaching/e6118_s00/papers/p79-patterson.pdf).
15. Rukkass, K., Zholtkevych, G. (2015). Distributed Datastores: Towards Probabilistic Approach for Estimation of Dependability. 11th International Conference on ICT in Education, Research, and Industrial Applications, 1356, pp.523-534, available at <https://pdfs.semanticscholar.org/5eb0/01632c6cd6da2e4ec92adbc288939de0f4f9.pdf>.

Received (Надійшла) 26.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.05.2020

### Балансування узгодженості у розподіленому сховищі даних

К. М. Руккас, Г. Г. Жолткевич

**Анотація.** Предметом цієї статті є CAP-гарантії розподілених баз даних, зокрема, доступність та узгодженість. Метою є спроектоване рішення, яке стане інструментом балансування узгодженості як однієї з гарантій надійного розподіленого сховища для будь-яких бізнес потреб і яке дозволить не погіршити значення доступності. Такий алгоритм міг би бути інтегрований у інфраструктуру розподіленого сховища даних і повинен бути одною з перших програм на шляху до виконання SQL запиту і може використовувати різні модулі проміжного програмного забезпечення бази даних на вузлу. Для досягнення цього були розроблені і порівняні три альтернативних рішення для балансування консистентних вузлів, досліджена фактична можливість реалізації кожного з рішень. Методами розробки стали такі інструменти, як UML моделювання, комп'ютерна модель, що реалізує імітаційні моделі для всіх розроблених рішень, яка дозволила провести набір експериментів на досліджених імітаційних моделях і оцінити складність та можливу швидкодію, зробити висновки, вибрали один з найоптимальніших підходів для подальшої розробки та розширення. Як висновок, готове оптимальне спроектоване і оцінене рішення для балансування узгодженості, що і було метою статті. Воно може бути застосоване у якості одного з базових компонентів проміжного програмного забезпечення розподіленої бази даних на етапі проектування будь-якого програмного забезпечення таким чином, що можуть бути досягнені збалансовані гарантії для надійного сховища на ранньому етапі імплементації бізнес потреб.

**Ключові слова:** CAP-гарантії, балансування навантаження, розподілені бази даних, висока доступність, жорстка узгодженість.

Т. В. Смірнова

Центрально український національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ФОРМУВАННЯ ЕВРИСТИЧНИХ ПРАВИЛ, БАЗИ ЗНАТЬ ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ Й ПРАВИЛ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ХМАРНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

**Анотація.** Предметом вивчення у статті є структура технологічного процесу для оптимізаційної хмарної інформаційної системи, формування евристичних правил та бази знань. **Метою роботи** є формування евристичних правил, бази знань та формалізація структури й правил технологічного процесу для оптимізаційної хмарної інформаційної системи. **Задачі:** В процесі формування структури технологічного процесу визначити низку параметрів, які не регламентуються вимогами до готового виробу, але їх значення суттєво впливають на результат планування технологічних операцій. Інформаційна система повинна забезпечити правильність заповнення вимог до результатів технологічного процесу. Система повинна забезпечити контроль повноти та сумісності вхідних даних, проводити контроль наявності вимог, які не можна визначити із вже заданих критеріїв. Також система повинна забезпечити можливість залишити вимогу невизначеною, якщо з вже визначених величин можлива оцінка цієї вимоги. На основі вимог технологічного процесу сформулювати евристичні правила. Розробити структуру інформаційної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів відновлення поверхонь деталей електродуговим напиленням. **Результатами роботи** є інформаційна система яка включає у себе: базу знань, що містить, допустимі діапазони вхідних даних, забезпечує контроль повноти та сумісності вхідних даних, проводить контроль наявності вимог, які не можна визначити із вже заданих критеріїв. Забезпечує можливість залишити вимогу невизначеною, якщо з вже визначених величин можлива оцінка цієї вимоги. З зазначених вимог технологічного процесу сформульована група евристичних правил, розроблено структуру інформаційної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів відновлення поверхонь деталей електродуговим напиленням. **Висновки:** наукова новизна полягає у формуванні технологічного процесу для оптимізаційної хмарної експертної системи. Сформульована група евристичних правил, розроблена структура інформаційної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів відновлення поверхонь деталей електродуговим напиленням.

**Ключові слова:** інформаційна система, інформаційні процеси, технологічний процес, оптимізація, евристичні правила.

### Вступ

В сучасних умовах у матеріалознавстві, для створення виробів з покриттям, або відновлення чи зміцнення поверхонь деталей використовують різні технологічні процеси [1-5]. Одним з таких технологічних процесів є електродугове напилення (ЕДН). Процес електродугового напилення складається з ланцюга технологічних операцій «Струменево-абразивна обробка» – «Нанесення підшару» – «Нанесення основного шару покриття», при цьому кожна з зазначених технологічних операцій має свої параметри [4]. Доцільним є формування системи вибору оптимальних параметрів для кожної технологічної операції у ланцюгу, з метою отримання деталей або поверхонь з найкращими показниками за тими, або іншими критеріями [2-5]. Для цього автором вирішується завдання розробки структури інформаційного забезпечення процесу оптимізації технологічного процесу електродугового напилення, у вигляді відповідної хмарної інформаційної системи. Для вирішення даного завдання автором пропонується вирішити такі підзадачі:

1. Формалізувати структуру технологічного процесу електродугового напилення.
2. Реалізувати структуру технологічного процесу електродугового напилення.
3. Сформулювати евристичні правила та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення.
4. Формалізувати структуру та правила технологічного процесу, зведення до універсального технологічного процесу.

5. Розробити та наповнити бази знань.
6. Сформулювати діаграму використання інформаційної системи забезпечення побудови та оптимізації технологічного процесу електродугового напилення.

7. Сформулювати діаграму послідовності використання інформаційної системи забезпечення побудови та оптимізації технологічного процесу електродугового напилення.

Перша та друга підзадача розглянуті у роботі [4]. Дана робота присвячена реалізації третьої та четвертої підзадачі тобто, формуванню евристичних правил та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення, й формалізації структури та правил технологічного процесу, зведення до універсального технологічного процесу.

**Мета роботи:** сформулювати евристичні правила, бази знань та формалізувати структуру й правила технологічного процесу для оптимізаційної хмарної інформаційної системи. Для досягнення поставленої мети необхідно в процесі формування структури технологічного процесу визначити низку параметрів, які не регламентуються вимогами до готового виробу, але їх значення суттєво впливають на результат планування технологічних операцій. Інформаційна система повинна забезпечити правильність заповнення вимог до результатів технологічного процесу. Система повинна забезпечити контроль повноти та сумісності вхідних даних, проводити контроль наявності вимог, які не можна визначити із вже заданих критеріїв. Також система повинна забезпечити можливість залишити вимогу невизначеною, якщо з вже визначених величин можлива оцінка цієї вимоги. На основі вимог технологіч-



ного процесу сформулювати евристичні правила. Розробити структуру інформаційної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів відновлення поверхонь деталей електродуговим напиленням.

### Результати досліджень

**Формування евристичних правил та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення.** В процесі формування структури технологічного процесу потрібно визначити низку параметрів, які не регламентуються вимогами до готового виробу, але їх значення суттєво впливають на результат планування технологічних операцій. Також, не регламентовані вимоги не можуть бути виражені ні математично або алгоритмічно, і виводяться з власного досвіду експертів.

Для проектування технологічного процесу потрібно визначити: геометричні розміри деталі, поверхню якої потрібно обробити або відновити; для відновлення валів критичними є значення довжини оброблюваної частини деталі  $L_0$ , діаметр  $D_0$  при якому утвориться мінімальний циліндр покриття деталі, цей параметр має вплив на мінімальну можливу дистанцію напилення  $L$ . Також з означених параметрів робиться висновок про можливість вста-

новлення валу на верстат автоматичної подачі. Деталі, які не є валами, повинні оброблятися вручну.

Важливу роль має матеріал з якого зроблено деталі, поверхня якої піддається обробці. Наприклад, за «Valid and invalid contacts of metals in accordance with GOST 9.005-72» визначаються матеріали, які не допустимі в спільному використанні з точки зору корозійної стійкості. В разі присутності у вимогах до результату обробки деталі матеріалу покриття, який є несумісним з матеріалом основи, технічний процес повинен обов'язково доповнюватися нанесенням прошарку з металу, який є сумісним з основою та покриттям одночасно. Згідно зазначеним особливостям планування технологічного процесу напилення потрібно визначити вхідні дані (табл. 1, собівартість процесу для цього прикладу не враховано). З зазначених вимог що до визначення вимог технологічного процесу виникають наступна група евристичних правил:

*Правило 1.1:* Якщо вимога обов'язкова, вимагати заповнення відповідних полів.

*Правило 1.2:* Вимога перестає бути обов'язковою, якщо визначено параметр(и), за яким(и) можна провести процес визначення цієї вимоги.

*Правило 1.3:* Накладання умов оптимізації можливе лише для необов'язкових параметрів.

Таблиця 1 - Перелік вхідних параметрів та вимог до результатів технологічного процесу

№	Назва	Позначення	Обов'язковість
1	Твердість матеріалу основи для обробки	$\sigma_{ex}$	«Так»
2	Матеріал основи	$M_{ex}$	«Так»
3	Матеріал покриття	$M_{вих}$	«Ні», якщо задані властивості поверхні, інакше «Так»
4	Міцність зчеплення покриття до основи, адгезія	$A_1$	«Ні»
5	Геометр. розміри основи для нанесення покриття	$L_0, D_0, \dots$	«Так»
6	Геометричні розміри після нанесення покриття	$L_{вих}, D_{вих}, \dots$	«Ні», якщо задана товщина слою нанесення, інакше «Так»
7	Товщина покриття	$h_{вих}$	«Ні», якщо задані вихідні розміри, інакше «Так»
8	Пористість покриття	$\rho_{вих}$	«Ні»
9	Твердість покриття	$\sigma_{вих}$	«Ні», якщо заданий матеріал поверхні, інакше «Так»
10	Зносостійкість покриття	$J_{вих}$	«Ні», якщо заданий матеріал поверхні, інакше «Так»
11	Товщина підшарку	$h_{нід}$	«Ні»

*Правило 1.4:* Необов'язкові параметри можна залишити не заданими, але автоматично на всі параметри повинні накладатися обмеження, які відповідають фізичним властивостям процесу.

*Правило 1.5:* Якщо вимога суперечить іншій вимозі, провести вибір пріоритету, і менш пріоритетну вимогу перевести в критерій оптимізації з високим пріоритетом.

*Правило 1.6:* Якщо вимога або критерій не задані, накласти а вимогу критерій оптимізації низького пріоритету на мінімізацію витрат ресурсів з врахуванням допустимих меж.

Наступні евристично визначені дії пов'язані з обранням технологічних дій:

*Правило 2.1:* Якщо за геометричними параметрами деталь не можна встановити на обладнання автоматичної обробки, потрібно перейти до розрахунків продуктивності та точності ручної праці.

*Правило 2.2:* Якщо матеріали деталі та покриття є такими що важко поєднувати з точки зору хімічної сумісності, закріпити операцію нанесення під-

шарку як обов'язкову.

*Правило 2.3:* Якщо матеріал покриття має недостатню адгезію до матеріалу деталі, закріпити операцію нанесення підшарку як обов'язкову.

*Правило 2.4:* Якщо товщина  $h_{вих}$  нанесення матеріалу значна, запропонувати можливість нанесення підшарку з більш дешевого матеріалу.

Наступні правила призначені для визначення функціональних призначень технологічних операцій, що може вплинути на визначення дій в наступній групі операцій:

*Правило 3.1:* Якщо матеріали деталі та покриття по хімічному складу та механічним властивостям частково не сумісні, то позначити операцію нанесення підшарку як обов'язкову з додаванням атрибуту {«сумісність»}. Можливе використання кількох призначень. Результат може бути виведений логічно при врахуванні результатів застосування правил 2 групи.

*Правило 3.2:* Якщо відновлювальна поверхня має корозійні забруднення, визначити дробостру-

мінну обробку як обов'язкову операцію з додаванням атрибуту {«очищення»}.

**Правило 3.3:** Якщо адгезія між базовим матеріалом та нанесенням не достатня, та збільшення контактної площі шляхом підвищення шорховатості достатнє для досягнення заданої величини, то додати операцію дробострумінної обробки як обов'язкову з атрибутом {«адгезія»}.

**Правило 3.4:** Якщо адгезія між базовим матеріалом та нанесенням не достатня, позначити технологічну операцію нанесення з додаванням атрибуту {«адгезія»}.

**Правило 3.5:** Якщо товщина нанесення покриття  $h_{вих}$  є значною (залежить від матеріалу покриття), то додати операцію нанесення підшарку з додаванням атрибуту {«заповнення»}.

**Правило 3.6:** Якщо операція нанесення покриття призначена для поверхневого шару, додати їй атрибут {«поверхня»}.

Четверта група евристичних правил призначена для уточнення параметрів та вимог до технологічних операцій згідно виставлених атрибутів:

**Правило 4.1:** Якщо передбачено нанесення підшарку з присутнім функціональним призначенням {«заповнення»}, провести процедуру визначення  $h_{nid}$  – товщини підшарку.

**Правило 4.2:** Якщо дробострумінні операції задані атрибутами {«адгезія»} та {«очищення»}, внести корекцію часу обробки та об'єднати операції.

**Правило 4.3:** Якщо операції нанесення підшарку мають атрибути {«адгезія»} та {«заповнення»} і при цьому використовують однаковий матеріал, то об'єднати операції та їх атрибути.

**Правило 4.4:** Якщо операції нанесення підшарку мають атрибути {«заповнення»} та {«поверхня»} і при цьому використовують однаковий матеріал, то об'єднати операції та їх атрибути.

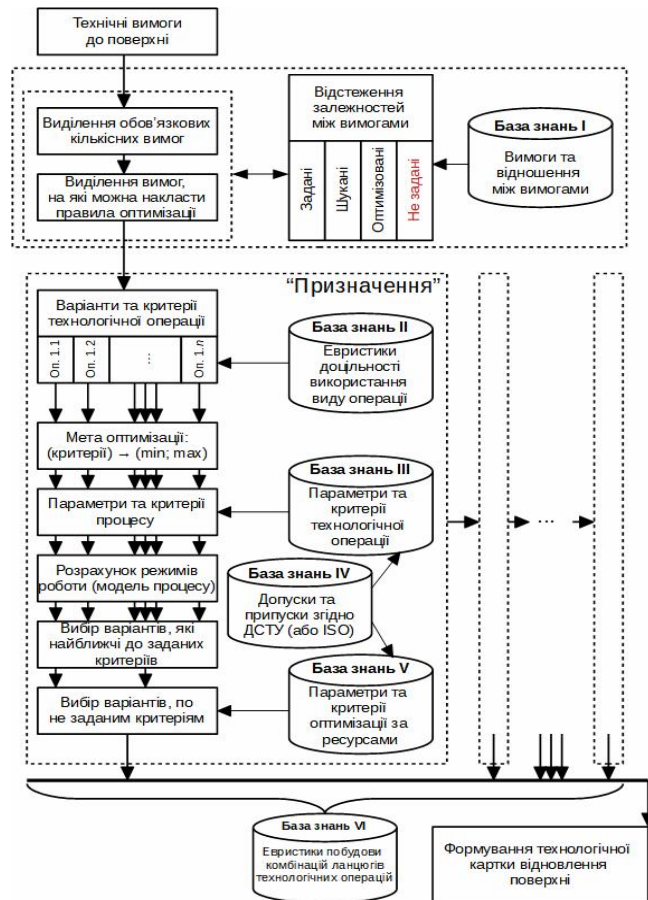
**Правило 4.5:** Якщо операція немає атрибуту, то вилучити її з ланцюга операцій.

**Формалізація структури та правил технологічного процесу, зведення до універсального технологічного процесу.** На основі розглянутих та розроблених методів та механізмів, які використовують для розробки технологічних процесів розроблено структуру інформаційної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів відновлення поверхонь деталей електродуговим напиленням яку показано на рис. 1.

Систему умовно можна поділити на етапи, згідно розроблених в попередньому пункті евристичних правил.

Перший етап призначений для формалізації вимог до результатів технологічного процесу та визначення вхідних параметрів деталі, яка підлягає відновленню поверхні. При цьому виділяються вимоги до результату обробки та критерії оптимізації. При недостатній кількості критеріїв або вимог, евристичними правилами першої групи вводяться обмеження а також критерії оптимізації низького пріоритету. З причини можливості існування конфліктів у вимогах, що повинно відобразитися в базі

знань по відношенням між вимогами, проводиться заміна критеріїв на критерії оптимізації з підвищеним пріоритетом. В результаті не задані критерії та вимоги переводяться в розряд слабких критеріїв оптимізації.



**Рис. 1.** Схема функціонування інформаційної системи підтримки рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів відновлення поверхонь деталей електродуговим напиленням

Шукані вимоги відповідають за порядок технологічних операцій при виконанні технологічного процесу та параметрів, режимів проведення технологічних операцій. В більшості ситуацій шукані параметри переходять у формування технологічної картки процесу.

Другий етап є структурною оптимізацією, яка має визначити допустимі ланцюги технологічних операцій. Але в складних технологічних процесах з великою кількістю операцій ця задача має комбінаторну складність, що призводить до непомірно великої кількості можливих рішень, які не можна розглянути за розумний інтервал часу.

Значно скоротити кількість розглянутих комбінацій можна завдяки використанню евристичних правил, які враховують технічне призначення технологічної операції, наприклад підготовка поверхні не може передувати нанесенню поверхневого шару. Це виражено в формуванні евристичних правил груп 2 та 3. Де друга група визначає призначення операції, а третя – відношення порядку та рівності між операціями. Відношення рівності застосовне у

випадках, коли одна технологічна операція може виконати кілька призначень. Наприклад, нанесення підшару може виконувати задачі збільшення адгезії та підвищення хімічної сумісності матеріалу деталі та матеріалу покриття.

Систему умовно можна поділити на етапи, згідно розроблених в попередньому пункті евристичних правил. В разі об'єднання або зміни технологічних операцій можуть виникати додаткові параметри та критерії обробки, що відображено в евристичних правилах четвертої групи. Тому наступним етапом оптимізації є використання фільтру доцільності операцій та процесу додавання критеріїв вимог, що не завжди можна повністю автоматизувати. Проте цей етап гарантує що додаткові параметри та критерії не будуть втрачені при побудові технологічного процесу.

В результаті проведення процесу оптимізації технологічного процесу по допустимим евристичними правилами, отримуємо множину ланцюгів окремо оптимізованих технологічних процесів, з якої проводиться багатокритеріальний відбір, що відповідає поставленим вимогам оптимізації. Користувач системи

може отримувати у відповідь як і одну картку технологічного процесу, так і декілька найкращих.

## Висновки

В роботі сформовано технологічний процес для оптимізаційної хмарної експертної системи, також сформульована група евристичних правил, розроблена структура інформаційної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів відновлення поверхонь деталей електродуговим напильником.

У наступних роботах автору необхідно вирішити наступні підзадачі:

– Розробити та наповнити бази знань.

– Сформулювати діаграму використання інформаційної системи забезпечення побудови та оптимізації технологічного процесу електродугового напильника.

– Сформулювати діаграму послідовності використання інформаційної системи забезпечення побудови та оптимізації технологічного процесу електродугового напильника.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лимаренко В. В. Інформаційна система підтримки рішень для автоматизації створення технологічних процесів механообробки деталей високоточного обладнання», дис. канд. техн. наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019.
2. Анфёров М.А. Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении / М.А. Анфёров, С.Г. Селиванов. – Уфа: Гилем, 1996. – 185 с.
3. Смірнова Т. В., Дресев О. М., Смірнов О. А. Експертна система оптимізації процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей типу «ВАЛ» електродуговим напильником». *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : ПНТУ, 2019. Вип. 2(54). С. 149-154. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.2.149>
4. Смірнова Т.В. Формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напильника для оптимізаційної експертної системи. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1(19). С. 43-56.
5. Скрипка К.І., Зенкин М.А. Експертна система автоматизованого вибору способів відновлення спрацьованих деталей, *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2004. № 1 (28). С. 66-68,
6. Хох В.Д., Мелешко Є.В., Якименко М.С. Дослідження методів побудови експертних систем». *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : ПНТУ, 2016. Вип.. 4(40). С.48-52.

Received (Надійшла) 20.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2020

## Formation of the heuristic rules, knowledge bases and formalization of the structure and the rules of the technological process for the optimization of the cloud information system

T. Smirnova

**Abstract.** The article deals with the structure of technological process for optimization of cloud information system, formation of heuristic rules and knowledge base. The purpose of the work is to formulate heuristic rules, knowledge base and formalize the structure and rules of the technological process for the optimization cloud information system. Objectives: In the process of forming the structure of the technological process to determine a number of parameters that are not regulated by the requirements for the finished product, but their values significantly affect the result of planning technological operations. The information system must ensure that the requirements for the results of the technological process are correctly met. The system must ensure that the completeness and compatibility of the input data is monitored and that requirements that cannot be determined from the criteria already specified are monitored. The system must also allow the requirement to be left undetermined if an estimate of that requirement is possible from the values already determined. Formulate heuristic rules based on process requirements. To develop the structure of decision support information system for automation of creation of optimized technological processes of surface restoration of parts by electric deposition. requirements that cannot be determined from the criteria already specified. Provides the ability to leave a claim undetermined if an estimate of that requirement is possible from the values already determined. Based on these requirements of the technological process, a group of heuristic rules was formulated, the structure of the information system of decision support was developed to automate the creation of optimized technological processes for the restoration of parts surfaces by electric sputtering. Conclusions: The scientific novelty lies in the formation of a technological process for an optimization cloud expert system. A group of heuristic rules is formulated, the structure of the information system of decision support for the automation of creation of optimized technological processes of restoration of surfaces of details by an arc deposition is developed.

**Keywords:** information system, information processes, technological process, optimization, heuristic rules.

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## МОДЕЛЬ ІНТЕРФЕЙСУ ПОЯСНЕНЬ З ТЕМПОРАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ В РЕКОМЕНДАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є процеси представлення пояснень для персоналізованих пропозицій в рекомендаційних системах. Метою є розробка моделі інтерфейсу пояснень до рекомендацій, що враховує зміни інтересів користувачів з часом. Завдання: визначення елементів темпорально-орієнтованого інтерфейсу пояснень для рекомендацій на основі структуризації існуючих підходів до представлення пояснень; розробка моделі інтерфейсу пояснення, що враховує темпоральну динаміку вимог користувача. Використовуваними підходами є: підходи до побудови рекомендацій на основі схожості вибору користувачів та предметів користувацького попиту. Отримані наступні результати. Сформульовано вимоги до інтерфейсу пояснень з темпоральними характеристиками. З урахуванням запропонованих вимог визначено структурні елементи представлення пояснень, що дають кількісну та якісну оцінку рекомендацій. Запропоновано модель інтерфейсу для представлення пояснень в рекомендаційній системі з урахуванням змін інтересів споживачів у часі. Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано модель візуального інтерфейсу для представлення пояснень в рекомендаційній системі з урахуванням темпоральної динаміки вподобань користувачів. Модель містить у собі групи візуальних та інтерактивних елементів. Візуальні компоненти відображають кількісні та якісні показники для поточного рекомендованого предмету, що показують динаміку продажів або рейтингів по інтервалах в рамках заданого періоду часу, а також сумарні зміни за цей період. Інтерактивні компоненти інтерфейсу дають можливість користувачеві визначити період часу для побудови пояснень, а також ступінь деталізації у часі темпоральних характеристик пояснення. Практична перевага запропонованої моделі полягає в тому, що сукупність статичних і динамічних показників, а також можливість коригування темпоральних параметрів дозволяють задовільнити критеріям прозорості, довіри, результативності та переконливості щодо пояснень до рекомендацій і, тим самим, створюють умови для підвищення кількості лояльних споживачів та відповідного збільшення продажів рекомендованих предметів.

**Ключові слова:** рекомендаційні системи, пояснення, формування рекомендацій, формування пояснень, критерії оцінки пояснень, темпоральні правила.

### Вступ

Рекомендаційні системи забезпечують персоналізовану інформаційну підтримку вибору користувачів у самих різних сферах, зокрема при пошуку необхідних товарів, послуг, сервісів, інформації в системах електронної комерції [1], у закладах охорони здоров'я [2], у банківській діяльності [3], при вирішенні задач пошуку інформації в соціальних мережах [4], при організації навчання студентів [5]. Такі системи будують упорядкований перелік об'єктів, що відповідає інтересам конкретного споживача. В якості об'єктів можуть виступати товари, навчальні курси для студентів, схеми харчування та фізичної активності [6], тощо.

Рекомендований перелік об'єктів формується з використанням інформації про відомі інтереси поточного користувача та схожих на нього користувачів. Ці інтереси відображені в базі даних рекомендаційної системи (або інформаційної системи, до складу якої вона входить) записами про вже зроблений раніше вибір вказаних користувачів, а також про рейтинги, що були виставлені схожими споживачами.

Використання рекомендацій дає можливість збільшити продажі в системах електронної комерції, підвищити якість обслуговування в банківських системах, персоналізувати та підвищити ефективність навчання, оперативного встановлювати зв'язки в соціальних мережах з урахуванням персональних інтересів користувачів. Тому такі системи набули широкого поширення за останнє десятиріччя.

Однак причинно-наслідкові залежності, що використовуються при формуванні рекомендацій, є скритими від користувача. Відповідно, рекомендаційна система з точки зору споживача виглядає як «чорний ящик». Такий підхід зменшує довіру до рекомендаційної системи, в особливості у випадку, якщо користувач спочатку не задоволений отриманими рекомендаціями [7]. В результаті споживач може відмовитись від використання як рекомендацій, так і відповідної інформаційної системи.

Для представлення рекомендаційної системи у вигляді «білого ящика» рекомендації доповнюються поясненнями [8]. Пояснення дає можливість користувачеві краще зрозуміти відповідність його потребам запропонованих товарів, послуг, інформації. Витлумачення спрощує вибір об'єктів споживачем, збільшують його задоволеність отриманими персональними рекомендаціями і, як наслідок підвищують кількість споживачів серед відвідувачів відповідного сайту.

Таким чином рекомендаційна система має забезпечити користувача інформацією для обґрунтування свого персонального вибору з тим, щоб підвищити довіру до запропонованих рекомендацій. Зазначене обґрунтування базується на представленні пояснень щодо рекомендацій у такій формі, щоб користувач міг встановити причинно-наслідкові зв'язки між своїми інтересами та рекомендованим товаром, послугами або інформацією. Ефективність обґрунтування вибору на основі використання пояснення до рекомендацій залежить як безпосередньо від підходу до розрахунку або вибору витлумачення, так і від форми представлення останнього.

Існуючі підходи до формування та представлення пояснень базуються на методах витлумачення результатів логічного виводу в системах на базі прецедентів та в експертних системах [9]. Ряд досліджень були орієнтовані на автоматизоване виявлення знань для щодо пояснень. Такі знання формуються на основі інформації про рейтинги і в подальшому використовуються для побудови регресійної моделі, що застосовується для коригування рекомендацій згідно інтересів споживачів [10]. В роботах [11, 12] запропоновано враховувати динаміку зміни інтересів споживачів шляхом побудови пояснень на основі використання темпоральних правил [13]. Динамічні пояснення дають можливість врахувати останні зміни у рейтингах предметів, що виставлені користувачами рекомендаційної системи, а також збільшення або спад продажів відповідних товарів або послуг. Зміни в рейтингах можуть бути пов'язані із нестабільністю характеристик товарів, а зміни в продажах – із циклічним або подієвими змінами попиту. Тому пояснення, що враховують зміни інтересів користувачів у часів, відповідають критеріям довіри та переконливості [14] щодо пояснень в рекомендаційних системах.

Однак існуючі підходи до представлення пояснень орієнтовані на графічне зображення розподілу рейтингів або семантики товарів і послуг в рекомендації без урахування змін популярності товарів та поліпшення їх характеристик з часом.

Таким чином, проблема представлення пояснень з урахуванням темпоральної динаміки вповоду користувачів є актуальною.

**Метою статті** є розробка моделі інтерфейсу пояснень до рекомендацій, що відображає зміни інтересів користувачів з часом.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних задач:

- визначення елементів темпорально-орієнтованого інтерфейсу пояснень для рекомендації на основі структуризації існуючих підходів до представлення пояснень;
- розробка моделі інтерфейсу пояснення, що враховує темпоральну динаміку вимог користувача.

### Результати досліджень

**Визначення елементів темпорально-орієнтованого інтерфейсу пояснення до рекомендації.** Розробка та обґрунтування структури пояснень потребує попереднього відбору критеріїв оцінки витлумачень з урахуванням можливостей оцінювання темпоральної динаміки потреб користувачів.

Пояснення в рекомендаційних системах оцінюються за критеріями [15], які доцільно розбити на три групи за призначенням отриманих результатів:

- оцінка результатів інтерактивної взаємодії з користувачем з використанням пояснень щодо отриманих рекомендацій;
- оцінювання кількісних переваг для користувача та власника рекомендаційної системи за результатами використання пояснень;
- визначення зручності використання користувачем рекомендацій, що доповнені поясненнями.

Перша група містить критерії прозорості, оброблюваності та довіри. Критерій прозорості пояснення призначений для оцінки впливу витлумачення на результуючий вибір споживача. Він показує, чи була врахована подібність користувачів або характеристики товарів. Такий критерій не враховує зміни вимог користувачів, однак може бути використаний для оцінки актуальності даних в поясненнях до рекомендації.

Критерій оброблюваності орієнтований на оцінку впливу пояснення на зміни у виборі користувача. Такий критерій враховує персоналізацію рекомендацій шляхом ітеративного уточнення вибору з використанням як явного, так і неявного зворотного зв'язку від користувача. Відповідно, даний критерій дає можливість частково врахувати темпоральний аспект вимог споживачів. Однак обрахування даного критерію потребує проведення опитування користувачів.

Відповідність критерію довіри визначається на основі вибору користувача після ознайомлення з поясненнями. В даному випадку враховується динаміка інтересів користувача, що свідчить про можливість використання даного критерію при побудові темпорального представлення пояснень. Внаслідок нерегулярності вибору більшості користувачів досить важко визначити персональний показник довіри. Однак значення даного показника може бути обчислено для групи споживачів шляхом порівняння покупок предметів по групам до та після впровадження пояснень.

Друга група містить критерії результативності та переконливості. Відповідність першому критерію визначається на основі використання неявного зворотного зв'язку, представленого відмінностями у продажах товарів до та після використання пояснень. Для обчислення відповідності другому критерію враховуються результати явного зворотного зв'язку, представленого еволюцією рейтингів предметів після використання пояснень. Обидва критерії враховують зміни даних у часі і тому їх доцільно враховувати при побудові інтерфейсу пояснень з темпоральною динамікою.

Третя група показників дає можливість оцінити ступінь задоволеності користувача рекомендаціями і поясненнями та містить показники ефективності рекомендацій з точки зору користувача, а також задоволеності споживача. Ефективність оцінюється за витратами часу на вибір предметів, а задоволеність – шляхом опитування споживачів. Використання цих критеріїв потребує проведення опитувань користувачів рекомендаційної системи.

Наведений порівняльний аналіз критеріїв з точки зору їх придатності для оцінки темпоральних характеристик пояснень показує важливість використання критеріїв результативності та переконливості при визначенні інтерфейсу з темпоральною динамікою. Поєднання цих показників дає можливість оцінити вплив пояснень як на роботу рекомендаційної системи, так і на задоволеність споживача. В першому випадку на основі неявного зворотного зв'язку визначається вплив пояснень на зміну у об'ємі продажів. У другому випадку шляхом використання явного зворотного зв'язку встановлюється вплив пояснень на процес персоналізації вибору користува-

чів. Додатково також доцільно використовувати критерії довіри та прозорості. Критерій довіри встановлює вплив рекомендацій на зміни вподобань користувачів. Критерій прозорості дає можливість врахувати актуальність пояснення. Використання цих показників дозволяє обґрунтувати склад структурних елементів інтерфейсу пояснення з урахуванням темпоральної динаміки вподобань користувачів. Структуризація інтерфейсів пояснень до запропонованого рекомендаційною системою персонального переліку товарів та послуг дозволила виділити два альтернативних підходи до візуального представлення витлумачень:

- на основі графічного представлення інтересів групи схожих користувачів; форма представлення витлумачень містить рейтинги предметів;

- на базі текстового представлення властивостей товарів та послуг; форма представлення пояснень містить розвернутий або скорочений опис предметів, що входять до складу рекомендації.

Пояснення першого типу базуються на кількісній оцінці потреб споживачів. Представлення пояснення може бути сформовано як у вигляді рейтингів інших споживачів, так і у формі прогнозованого рекомендаційною системою рейтингу, що виставить предмету поточний користувач.

На практиці в рекомендаційних системах використовуються такі форми візуального представлення пояснень на основі вподобань користувачів зі спільними інтересами:

- гістограма розподілу рейтингів товару, послуги, інформації від всіх користувачів, кожен стовпчик якої відповідає кількості оцінок рекомендованого предмету з відповідним рейтингом;

- гістограма розподілу рейтингів від користувачів зі схожими інтересами;

- діаграми розподілу рейтингів у вигляді ієрархії зірочок або кругової діаграми.

Візуальне представлення рейтингу для поточного користувача містить два елементи:

- прогнозований рейтинг рекомендованого предмету, який в майбутньому може виставити споживач;

- відсоток правильних передбачень у запропонованих рекомендаційною системою пояснення даного типу.

Пояснення другого типу використовують переважно якісну оцінку товарів, що вибирають споживачі. Для представлення використовується або хмара тегів, або текстове пояснення. Тегами є ключові слова, що описують товар, послугу, інформацію. Розмір та форма тегів «підштовхує» користувача до вибору рекомендованого предмету. Представлення пояснень з використанням ключових слів класифікує запропонований товар, інформацію, послугу за їх базовими характеристиками. Наприклад, для фільмів таке представлення може позначати належність до декількох жанрів одночасно (комедія, детектив, блокбастер), вказувати ключового актора-зірку, характеризувати ключові сцени та діалоги (смішні діалоги, тощо). Текстове пояснення має традиційну форму та містить інформацію про сферу застосування, вартість використання та інші властивості рекомендованого предмету.

Таким чином, існуючі форми представлення пояснень потребують доповнення темпоральними характеристиками з урахуванням показників прозорості, результативності та переконливості.

Проведений порівняльний аналіз дає можливість визначити наступні вимоги до інтерфейсу пояснень з темпоральними характеристиками:

- представлення пояснень на основі кількісної оцінки щодо кожного рекомендованого предмету;

- можливість циклічного уточнення пояснень з урахуванням змін популярності відповідного предмету з часом;

- використання як явного, так і неявного зворотного зв'язку від споживачів для представлення витлумачень;

- доповнення кількісного представлення якісним на основі результатів зворотного зв'язку.

Узагальнений перелік структурних елементів форми представлення пояснення, що відповідає даним вимогам, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 - Перелік структурних елементів форми представлення пояснення

Структурні елементи представлення пояснення	Відповідність вимогам	Критерії оцінки пояснень
Актуальні рейтинги	Використання кількісної оцінки	Прозорість
Період часу для уточнення змін вподобань споживачів	Циклічне уточнення	Довіра
Динаміка рейтингів, продажів	Використання явного й неявного зворотного зв'язку	Результативність, переконливість
Представлення якісних характеристик (текст, виділення кольором, розміром ключових характеристик)	Доповнення кількісного представлення якісним	Довіра

Таким чином, до темпорально-орієнтованого представлення пояснення доцільно включити кількісні значення, що відображають зміни рейтингів або продажів. Тоді результати застосування пояснень до рекомендацій можуть бути кількісно оцінені згідно показників результативності та переконливості.

Розширене представлення пояснення може містити класичні елементи, що задають розподіл рейтингів, а також текстове пояснення до цифрових показників.

Характеристики пояснення можуть бути виділені засобами форматування тексту (колір, розмір) для того, щоб користувач звернув увагу на ключові аспекти пояснення.

**Модель візуального інтерфейсу представлення пояснень в рекомендаційній системі з урахуванням темпоральної динаміки вподобань споживача.** Згідно виконаної в попередньому підрозділі структуризації форми представлення пояснень, темпоральний інтерфейс витлумачення має містити візуаль-



ну та інтерактивну складові, що розкривають загальний контекст формування рекомендацій [16]. Візуальна складова відображає актуальні рейтинги та їх динаміку, а інтерактивна задає період часу для визначення динаміки вподобань схожих користувачів, а також ступінь деталізації цих вподобань. Деталізація визначається розміром темпорального інтервалу в рамках заданого періоду часу, який використовується для визначення змін у продажах або рейтингах. Інтерактивна складова  $I_s$  задається парою параметрів:

$$I_s = \{T, D: D = T/\Delta t\}, \quad (1)$$

де  $T$  – період часу, на якому визначаються темпоральні аспекти пояснення;  $D$  – деталізація динаміки вподобань користувача;  $\Delta t$  – інтервали часу, які визначають темпоральну деталізацію змін інтересів споживачів. Період часу  $T$  розбивається на кінцеву кількість інтервалів:

$$\sum_{i=1}^I \Delta t_i. \quad (2)$$

Таким чином, в інтерактивній компоненті користувач може змінити інтервал вибору даних для пояснень та ступінь деталізації динаміки вподобань щодо рекомендованого товару або послуги.

Зміни вподобань користувачів визначаються відносно кінцевого інтервалу  $\Delta t_j$  за допомогою темпоральних правил. Для кожної пари інтервалів  $(\Delta t_i, \Delta t_j), 1 \leq i \leq I$  визначаються темпоральні правила, що задають збільшення/зменшення рейтингу або продажів з часом:

$$R = \left\{ \left( n_i O n_j \right) \right\}, i = \overline{1, I-1}, j > i. \quad (3)$$

де  $O$  – темпоральний оператор, що визначає тип відношення між інтервалами;  $n_i, n_j$  – кількість продажів або значення рейтингів та інтервалах  $\Delta t_i$  та  $\Delta t_j$  відповідно.

Тип темпорального правила визначає візуальне відображення динаміки продаж або рейтингів. Наприклад, для правил типу «Next» [13], що визначають зміни на послідовних інтервалах, візуалізація динаміки вподобань користувачів може бути представлена стовпчиковою діаграмою з зазначенням інтервалу часу або дати під кожним стовпчиком. Для правил типу «Future» [13], що визначають зміни для довільної пари інтервалів, для візуалізації доцільно використовувати кругову діаграму. Кожний сектор цієї діаграми визначає циклічність попиту або рейтингу. Ваги  $w_{i,j}$  темпоральних правил відповідають вказаним змінам. Ваги обраховуються як нормалізована зміна рейтингів або продажів:

$$w_{i,j} = (n_j - n_i) / n_{\max}, \quad i < j. \quad (4)$$

де  $n_{\max}$  – максимальне значення рейтингу або кількості продажів рекомендованого предмету для періоду  $T$ .

Відповідно, візуальна складова  $V_s$  має містити множину  $W$  ваг темпоральних правил по інтервалах  $\Delta t_i$ :

$$W = \left\{ W_i : W_i = \sum_{\Delta t_i} w_{i,j} \right\}. \quad (5)$$

де  $W_i$  – сумарна вага темпоральних правил для інтервалу  $\Delta t_i$ . Множина  $W$  дає можливість сформувати діаграму, що візуалізує процес зміни вподобань користувачів. Інтегральний показник для темпоральної динаміки продажів або рейтингів відображає зміни по усім правилам для періоду часу  $T$ :

$$\Delta W = \sum_i W_i, \quad i < I. \quad (6)$$

Таким чином, візуальна складова містить у собі множину  $W$  ваг темпоральних правил по інтервалах, а також інтегральні зміни продажів або рейтингів  $\Delta W$ . Результуюча модель візуального інтерфейсу, що відображає темпоральний та статичний аспекти, має вигляд:

$$M = \{T, \Delta t, \Delta W, W, \rho, \Pi\}. \quad (7)$$

де  $\rho$  – актуальне значення рейтингу предмету;  $\Pi$  – правила оформлення текстової частини інтерфейсу.

Даний інтерфейс містить інформацію про зміни рейтингу або продажів і тому відповідає критеріям, переконливості та результативності. Наявність актуального рейтингу у складі моделі свідчить про відповідність критерію прозорості. Відповідність критерію довіри обґрунтовується використанням правил оформлення текстової частини інтерфейсу.

## Висновки

Запропоновано модель візуального інтерфейсу представлення пояснень в рекомендаційній системі з урахуванням змін інтересів споживачів у часі. Для візуалізації пояснень використовуються кількісні та якісні показники.

Група кількісних показників відображає темпоральну динаміку вподобань користувачів щодо рекомендованого товару або послуги. Для відображення цієї динаміки використовуються як деталізовані зміни продажів або рейтингів по інтервалах в рамках заданого періоду часу, так і сумарні зміни за цей період. Статичний аспект пояснення представлений актуальним рейтингом предмету.

Якісні характеристики визначаються правилами оформлення пояснюючого тексту до кількісних показників. Інтерактивна складова моделі представлена періодом часу та ступенем деталізації результатуючих числових показників. Така деталізація визначається протяжністю інтервалів часу, для яких розраховується динаміка споживацького попиту на рекомендований товар, послугу, інформацію.

Представлена модель, на відміну від існуючих, поєднує кількісні статичні й динамічні, а також якісні характеристики. Додаткова перевага моделі полягає в можливості інтерактивного вибору параметрів для обрахунку темпоральних параметрів пояснення.

При практичному застосуванні сукупність візуальних та інтерактивних елементів для користувача забезпечує довіру до пояснення а також можливість раціонального підтвердження вибору рекомен-



дованого предмету на основі комбінації числових показників. Сукупність таких факторів забезпечує підтримку лояльності користувачів рекомендаційної системи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Melville P., Sindhvani V. (2013). Recommender systems. In Encyclopedia of machine learning. Springer, pp.829–838.
- Emre S., Sevgi O. (2013). A systematic literature review on Health Recommender Systems. E-Health and Bioengineering Conference, EHB 2013, pp. 1-4.
- Gigli A., Lillo F., Regoli D. (2019). Recommender Systems for Banking and Financial Services. Proceedings of the 13th ACM Conference on Recommender Systems, pp. 536–537.
- Eirinaki M., Gao J, Varlamis J., Tserpes K. (2018). Recommender Systems for Large-Scale Social Networks: A review of challenges and solutions. Future Generation Computer Systems. 78, pp. 413-418.
- Del-Rio F., Parra D., Kuzmiec J., Svec E. (2017). Towards a Recommender System for Undergraduate Research. Proceedings of the Poster Track of the 11th ACM Conference on Recommender Systems (RecSys 2017).
- Kim J., Lee J., Park J. Lee Y. (2009). Design of Diet Recommendation System for Healthcare Service Based on User Information. Fourth International Conference. Computer Sciences and Convergence Information.
- Jeroen Van Barneveld J., Van Setten M. (2004). Designing usable interfaces for TV recommender systems. Personalized Digital Television, pp.259-285.
- Daher J, Brun A., Boyer A. A. (2017). Review on Explanations in Recommender Systems. Technical Report. LORIA Université de Lorraine, 26 p.
- Cunningham, P., Doyle, D., Loughrey, J. (2003) An Evaluation of the Usefulness of Case-Based Reasoning Explanation. In: Case-Based Reasoning Research and Development: Proceedings ICCBR. Number 2689 in LNAI, Trondheim, Springer, pp. 122–130.
- Cleger S., Fernández-Luna J., F Huete J. (2014). Learning from explanations in recommender systems. Information Sciences. Information Sciences, 287, pp.90–108.
- Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. (2019). Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. EUREKA: Physics and Engineering, 4, 34-40 DOI:10.21303/2461-4262.2019.00952.
- Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. (2019). Моделювання пояснень щодо рекомендованого переліку об'єктів з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача. Системи управління, навігації та зв'язку, 6 (58), 97-101. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.6.097>.
- Levykin V., Chala O. (2018). Development of a method for the probabilistic inference of sequences of a business process activities to support the business process management. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/3(95), 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142664.
- N Tintarev, J Masthoff (2007). A Survey of Explanations in Recommender Systems. In G Uchyigit (ed), Workshop on Recommender Systems and Intelligent User Interfaces associated with ICDE'07, 801-810.
- Tintarev N., Masthoff J. (2010) Designing and evaluating explanations for recommender systems, in Ricci, F. Rokach, L. Shapira, B. and Kantor, P. (Eds.), Recommender systems handbook, Springer, Dordrecht, 479–510.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. (2018). Моделювання контексту в рекомендаційних системах. Проблеми інформаційних технологій, 1(023), 21-26.

Received (Надійшла) 14.04.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.05.2020

### Explanation interface model with temporal parameters for the recommender system

Chalyi, V. Leshchynskyi, I. Leshchynska

**Abstract.** The **subject matter** of the article is the process of presenting explanations for personalized proposals in recommendation systems. The **goal** is to develop a model of the interface of explanations to the recommendations, which takes into account changes in the interests of users over time. **Tasks:** to define the elements of the temporally-oriented interface of explanations for recommendations based on the structuring of existing approaches to the presentation of explanations; development of an explanation interface model that takes into account the temporal dynamics of user requirements. The **approaches** used are: approaches to the construction of recommendations based on the similarity of the choice of users and items of user demand. The following **results** were obtained. Requirements for the interface of explanations with temporal characteristics are formulated. Taking into account the proposed requirements, the structural elements of the presentation of explanations are determined, which give a quantitative and qualitative assessment of the recommendations. The model of the interface for presentation of explanations in the recommendation system taking into account changes of interests of consumers in time is offered. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows. The model of the visual interface for representation of explanations in the recommendation system taking into account temporal dynamics of preferences of users is offered. The model includes groups of visual and interactive elements. Visual components display quantitative and qualitative indicators for the current recommended subject, showing the dynamics of sales or ratings at intervals within a given period of time, as well as the total changes for this period. The interactive components of the interface allow the user to determine the time period for constructing explanations, as well as the degree of detail in time of the temporal characteristics of the explanation. The practical advantage of the proposed model is that the set of static and dynamic indicators, as well as the ability to adjust temporal parameters can meet the criteria of transparency, confidence, effectiveness and persuasiveness to explain the recommendations and thus create conditions for increasing the number of loyal customers and increase sales of recommended items.

**Keywords:** recommender systems, explanation, formation of recommendations, formation of explanations, criteria for evaluating explanations, temporal rules.

В. А. Глива<sup>1</sup>, І. В. Матвєєва<sup>1</sup>, Л. О. Левченко<sup>2</sup>, Н. М. Кічата<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ДРІБНОДИСПЕРСНОЇ ЗАЛІЗОВМІСНОЇ СУБСТАНЦІЇ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

**Анотація.** На основі аналізу механізмів розсіювання іонізуючих електромагнітних випромінювань та залежності ослаблення випромінювання від порядкового номера елемента та його густини зроблено висновок про можливість їх екранування матеріалами з вмістом заліза. Запропоновано засади проектування композиційного металополімерного матеріалу для зниження інтенсивності рентгенівського та гама-випромінювань. Показано, що зміна поглинання іонізуючого випромінювання зі зміною довжини хвилі випромінювання відбувається немонотонно. Тому для проектування матеріалу необхідно з'ясувати переважні довжини хвиль (частоти) випромінювання, яке потребує екранування. Встановлено, що для ефективного екранування випромінювання існує критична концентрація металевих частинок у полімерній матриці. Це відбувається на порозі протікання електричного струму за вмісту екрануючої субстанції 11–12 % (за вагою). Це добре узгоджується зі співвідношеннями електродинаміки суцільних середовищ. При проектуванні матеріалу з використанням залізородного концентрату слід враховувати його різні властивості у залежності від виробника. Проектуванню захисного матеріалу повинні передувати лабораторні дослідження з визначення переважної фракції залізородних частинок за розмірами та вмісту заліза і його сполук у вихідній сировині.

**Ключові слова:** іонізуюче випромінювання, композиційний матеріал, залізородний концентрат, ефективність екранування.

### Вступ

Захист від впливу фізичних факторів техногенного походження є одним з пріоритетних напрямів дослідження в галузі цивільної безпеки. Найбільш критичним з цих факторів є іонізуючі випромінювання. Захист від їх впливу зазвичай здійснюється за допомогою гумових та полімерних матеріалів із вмістом свинцю. Але такі матеріали дуже важкі, а свинець є токсичним, що обмежує застосування цих виробів. Тому доцільним є розглянути можливості виготовлення захисних матеріалів без використання свинцю зі збереженням достатніх коефіцієнтів екранування шкідливих випромінювань.

У сучасних умовах спостерігається підвищення робочих частот радіотехнічного обладнання – джерел неіонізуючих випромінювань. При цьому ці частоти поступово переходять у область надзвичайно високих. Враховуючи, що іонізуючі гамма-випромінювання також є електромагнітним випромінюванням, доцільно розглянути можливості розроблення композиційного матеріалу для одночасного екранування іонізуючих та неіонізуючих випромінювань різного походження. Так можливість обумовлена наявністю добре розробленими технологіями вироблення композиційних металополімерних матеріалів для захисту від електромагнітних впливів з керованими захисними властивостями. Тому доцільно розглянути можливість розроблення на базі таких матеріалів захисних конструкцій для екранування іонізуючих випромінювань різного походження.

**Аналіз останніх публікацій і досліджень.** Основним напрямом досліджень і прикладних розро-

бок з захисту персоналу підприємств й установ, які працюють з джерелами іонізуючих випромінювань є створення захисних матеріалів без вмісту свинцю. Відомо, що поглинальні властивості елементів щодо усіх видів радіоактивних випромінювань зростають зі зростанням порядкового номера у періодичній таблиці, тобто зарядового числа  $Z$ . Тому найбільш прийнятним та поширеним металом для екранування випромінювань є свинець ( $N=82$ ). У роботах [1, 2] розглянуто можливість застосувати у якості екрануючого елемента вісмут ( $N=83$ ). Цей метал має погані фізико-механічні властивості, тому його застосували у вигляді оксиду як наповнювача у нанокомпозитних матеріалах на основі полімерів. За прийнятних коефіцієнтів екранування рентгенівського випромінювання, такі матеріали мають великі вартості через складність технологій виготовлення.

У статті [3] наведено результати розроблення композиційного матеріалу із застосуванням у якості екрануючих елементів диспрозію та гедолінію. Їх зарядові числа достатньо великі, але ці метали мають надзвичайно високу вартість, тому великі обсяги захисних покриттів з них (навіть за малого вмісту у полімерній матриці) виготовляти недоцільно.

У статті [4] розглянуто можливість виготовлення композитів з використанням сполук елементів з малим зарядовим числом – бора та лужних металів.

Наведені ефективності екранування невеликі. Крім того, застосований карбід бора дуже дорогий у виробництві.

Багато досліджень присвячено визначенню захисних властивостей матеріалів із вмістом вольфра-

му. Так, у роботі [6] запропоновано композитний матеріал з етилен-вініл-ацетату з вольфрамовим наповнювачем, а у дослідженні [7] з наповнювачем з оксиду вольфраму. У цій же статті порівняно властивості композиційних матеріалів на основі сульфату барію, триоксиду вісмуту та оксиду вольфраму зі свинцем. Показано, що їх захисні властивості тільки на 10-15 % гірші за властивості чистого свинцю, що для більшості реальних виробничих умов цілком задовільно. При цьому, як показано у [8], у якості матриці можливо застосувати епоксидні матеріали, які не деградують під впливом іонізуючих випромінювань.

У роботі [9] наведено результати розроблення і дослідження захисних властивостей електромагнітних металополімерних екранів у високочастотній області спектра. Матеріал виготовлено з використанням збагаченої залізної руди у якості наповнювача полімерної матриці. Коефіцієнти екранування електромагнітних полів ультрависоких частот за вмісту металевої субстанції 5–20 % складають 3,3–44. Рационально розглянути можливості застосування таких матеріалів для екранування іонізуючих випромінювань. Наповнювач з залізородної сировини має низьку вартість і є перспективним для екранування поверхонь великих площ, тому актуальним є оцінювання його ефективності для іонізуючих випромінювань.

**Мета роботи** – визначення можливості використання залізної та залізвмісної дрібнодисперсної субстанції для створення композиційних матеріалів для захисту від впливу іонізуючих випромінювань.

### Виклад основного матеріалу

Аналіз досліджень з екранування іонізуючих випромінювань елементами з зарядовими числами меншими, ніж заряд ядра свинцю, свідчить, що цей напрям є перспективним для зниження рівне випромінювань, принаймні малих інтенсивностей. Такими випромінюваннями є, наприклад, паразитні випромінювання медичної апаратури, випромінювання обладнання у апаратних радіотехнічних засобів цивільної авіації тощо. Найбільш вагомою складовою таких випромінювань є гама-випромінювання. Ослаблення гама-випромінювання у шарі матеріалу визначається залежністю:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\mu d},$$

Таблиця 1 – Залежність лінійних коефіцієнтів ослаблення свинцю та заліза від енергій гама-випромінювань

E, MeV	0,50	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0
$\mu_{Pb}, \text{см}^{-1}$	1,80	0,80	0,60	0,52	0,48	0,47	0,48	0,55
$\mu_{Fe}, \text{см}^{-1}$	0,66	0,50	0,38	0,34	0,30	0,26	0,25	0,23

Наведені дані свідчать, що коефіцієнти ослаблення заліза не настільки низькі, порівняно зі свинцем, щоб їх не можна було компенсувати, наприклад, деяким збільшенням товщини захисного шару. Звертає на себе увагу немонотонність зміни коефіцієнта ослаблення для свинцю, отримані експериментально.

де  $\varphi$  – щільність потоку  $\gamma$  квантів після проходження поглинального матеріалу;  $\varphi_0$  – щільність потоку  $\gamma$  квантів попереду поглинального матеріалу;  $d$  – товщина поглинального шару;  $\mu$  – лінійний коефіцієнт ослаблення.

Масовий коефіцієнт ослаблення  $\mu_M = \mu/\rho$  ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ), коефіцієнт, віднесений до лінійного коефіцієнта ослаблення. Зниження інтенсивності гама-випромінювання відбувається за трьома механізмами. Фотоэффект переважає за енергій  $E_\gamma < 0,5$  MeV. Масовий коефіцієнт ослаблення фотоэффекту  $\tau/\rho$  зростає зі збільшенням порядкового номера (зарядового числа) елемента  $Z$  й знижується зі зниженням енергії фотона:

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{Z^4}{(hv)^2},$$

де  $h$  – стала Планка,  $\nu$  – частота фотона.

За енергій, більших 1 MeV (приблизно до 5 MeV) переважає механізм утворення електронно-позитронних пар. Масовий коефіцієнт ослаблення утворення пар  $k/\rho$  визначається як:

$$\frac{k}{\rho} \sim Z \lg(hv).$$

За енергій фотонів 30 кеВ–5 MeV переважає ефект Комтона (розсіювання фотонів на вільні електрони):

$$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{1}{hv}$$

Повний коефіцієнт ослаблення  $\mu$  визначається як:

$$\mu = \tau + k + \sigma.$$

Лінійний коефіцієнт ослаблення  $\mu^l$  ( $\text{м}^{-1}$ ) визначається як:

$$\mu^l = \mu \cdot \rho.$$

Наведені вище співвідношення для трьох видів розсіювання енергій фотонів не є суворими, але достатні для оцінювання ефективності поглинання. Для свинцю дані щодо лінійних коефіцієнтів відомі, тому доцільно порівняти їх із залізом, яке використовувалося у якості екрануючої субстанції у металополімерному композиті для екранування електромагнітних неіонізуючих полів [9] (табл. 1).

Цей факт свідчить про резонансні явища при поглинанні фотонів на деяких частотах для конкретного матеріалу.

Це підтверджується даними про масові коефіцієнти ослаблення рентгенівського випромінювання (табл. 2). Представлені результати свідчать, що для

деяких довжин хвиль ефективність заліза вища за ефективність свинцю, причому це відбувається на умовній межі «м'якого» рентгенівського випромінювання,

притаманного побічним (паразитним) випромінювань технічних засобів різного призначення.

Таблиця 2 – Залежність масового коефіцієнта ослаблення свинцю та заліза від довжинних хвиль рентгенівського випромінювання

Елемент	$\lambda$ , нм									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
$\mu/\rho$ , м <sup>2</sup> /кг, Pb	46	330	770	1470	770	1280	1800	2580	3600	3820
$\mu/\rho$ , м <sup>2</sup> /кг, Fe	11	71	235	507	950	1700	2700	3900	610	780

Це відкриває можливості застосування для екранування іонізуючих електромагнітних випромінювань композитних металополімерних матеріалів на основі дрібнодисперсного заліза. У роботі [9] наведено технології виготовлення й дані щодо екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких частот композитом з латексу та залізовмісного наповнювача з концентрату залізної руди. Головною проблемою, враховуючи малі довжини хвиль іонізуючих випромінювань, є вибір концентрації дрібнодисперсної металеві субстанції, яка забезпечує мінімальні та потрібні рівні ослаблення випромінювань. Для цього металеві частини повинні бути рівномірно та щільно розподілені у тілі полімеру.

Для розсіювання випромінювання матеріалом металеві частинки повинні утворювати практично суцільну структуру. Тобто, необхідно визначити концентрацію металевих частинок, достатню для екранування іонізуючих випромінювань. Це можливо реалізувати методом вимірювання електрофізичних властивостей матеріалу за різних концентрацій екрануючої субстанції – дрібнодисперсного пилу залізної руди. Визначення питомої провідності здійснювалося вимірюванням зворотної величини – питомого опору матеріалу методом подвійного мосту (рис. 1).

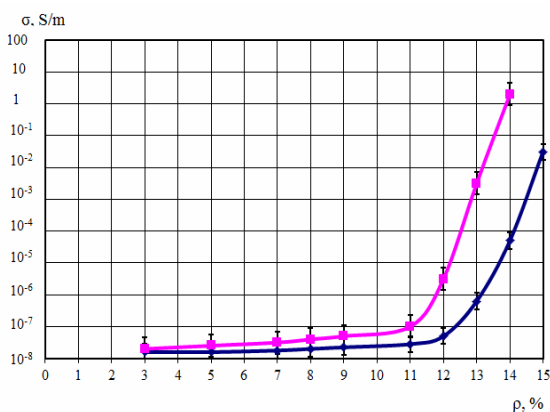


Рис. 1. Залежність питомої провідності металополімерного матеріалу від концентрації дрібнодисперсної металеві субстанції ■ – 5–10 мкм, ◆ – 15–25 мкм

З графічних даних видно, що різке підвищення провідності відбувається за концентрації металевих частинок 11-12 % (за вагою). Це свідчить, що за цих концентрацій матеріал досягає порогу провідності електричного струму, тобто провідні частинки утво-

рюють ланцюги провідності і починають контактувати одна з одною. Це добре узгоджується зі співвідношеннями електродинаміки суцільних середовищ. За концентрацій залізних частинок 15–20 % композиційний матеріал має властивості провідника й придатний для екранування як неіонізуючих, так й іонізуючих електромагнітних випромінювань.

Забезпечення суцільності матеріалу у наведений спосіб гарантовано тільки з достатньо великих товщин композиційного матеріалу (5-10 мм). Якщо йдеться про захисний матеріал малої товщини (0,5-1,0 мм), то потрібно шукати інші шляхи підвищення його ефективності щодо екранування іонізуючих електромагнітних випромінювань. Рис.1 свідчить, що збільшення дисперсності екрануючих залізних та залізовмісних частинок підвищує потрібні електрофізичні властивості (у даному випадку – питому електропровідність).

Для здешевлення вихідної сировини можливо застосувати готовий залізорудний пил різної і відомої дисперсності. Такий пил накопичується на фільтрувальних завісах аспіраційних систем ділянок зі збагачення залізної руди. Фільтрувальних завіс кілька. Розташовані вони послідовно. Тому, на них осідає пил різних дисперсностей.

Дослідження щодо гранулометричних характеристик частинок залізорудного пилу виконувалися на різних завісах, тому для застосування такого пилу додаткового аналізу виконувати не треба. Але вміст феромагнетиту у такому пилу (заліза та магнетиту) не перевищує 58-60 %, що знижує ефективність кінцевого виробу.

Для підвищення коефіцієнтів екранування у якості наповнювача можливо застосовувати залізорудний концентрат, отриманий методом флотації. Він має вміст заліза та магнетиту 72-90 % (у залежності від виробника). Розмір частинок 150-200 мкм. Але у висушеному вони злипаються. Тому доцільно їх механічно подрібнити. Це можливо із застосуванням кулькових млинів стандартної конструкції.

Ще одною проблемою є отримання з металеві субстанції та полімеру однорідної суміші з мінімальним злипанням екрануючих частинок. Це можливо забезпечити ультразвуковою обробкою рідкої суміші металополімеру. Висока дисперсність та щільність розташування металевих частинок має ще одну перевагу.

Найбільш поширеним джерелом іонізуючого випромінювання у промислових пристроях є Со<sub>60</sub> з енергіями гама-квантів 1,2 МеВ. На щільно упако-

ваних металевих та металовмісних кристалах ці випромінювання повинні піддаватися резонансному комбінаційному розсіюванню.

Перевагою таких матеріалів є можливість виготовлення екрануючих поверхонь великих площ, що обумовлене низькою вартістю залізорудного концентрату.

У наведеному прикладі у якості полімерної матриці використовувався латекс, що не має принципового значення і він може бути замінений будь-яким полімером. Єдиною умовою є відсутність деградації механічних властивостей під впливом випромінювання.

Наведений підхід дозволяє проектувати матеріали з прогнозуваннями (необхідними) захисними властивостями за рахунок зміни концентрації залізвмісної субстанції та товщини матеріалу.

При проектуванні таких матеріалів слід враховувати, що залізорудний концентрат окремих виробників має різну дисперсність та вміст заліза та магнетита. Ці параметри необхідно попередньо визначати через залежність захисних властивостей від розмірів екрануючих частинок та провідності матеріалу від вмісту заліза.

## Висновки

1. Показано, що для м'якого іонізуючого випромінювання у якості субстанції, яка забезпечує його екранування можливо використання заліза та його сполук, які містяться у залізорудному концентраті.

2. Для деяких довжин хвиль іонізуючого випромінювання екрануючі властивості заліза перевищують цей показник для свинцю. Захисні властивості металевих матеріалів змінюються немонотонно, зі зміною довжини хвиль випромінювання, що треба враховувати при виконанні проектних робіт.

3. Для екранування іонізуючих випромінювань доцільно застосовувати композиційний метало-полімерний матеріал на основі залізорудного концентрату. Зміна концентрації екрануючої субстанції дозволяє проектувати захисні матеріали потрібної ефективності та визначених геометричних характеристик.

4. Для підвищення якості екрануючого матеріалу необхідним є попереднє визначення у лабораторних умовах дисперсності вихідної екрануючої сировини та вміст у концентраті заліза та його сполук.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Nambiar S., Osei E. K., Yeow J. T. W. Polymer nanocomposite based shielding against diagnostic X rays. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013. 127(6). pp. 4939–4946.
- Ambika M.R., Nagaiah N., Suman S. K., Role of bismuth oxide as a reinforcer on gamma shielding ability of unsaturated polyester based polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. 134 (13). PP. 446–457.
- Singh V.P., Badiger N. M. Kothan, S., Kaewjaeng S., Korkut, T., Kim H. J., Kaewkhao J. Gamma-ray and neutron shielding efficiency of Pb-free gadolinium based glasses. *Journal of Nuclear Science and Techniques*. 2015. № 27(4). P. 103–112.
- Mann K. S., Rani A., Heer M. S., Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays. *Radiation Physics and Chemistry*. 2015. 106. PP. 247–254.
- Mann K. S., Sidhu G. S. Verification of some low-Z silicates as gamma-ray shielding materials. *Annals of Nuclear Energy*, 2012. 40(1), PP. 241–252.
- Ersoz O. A., Lambrecht F. Y., Soylu H. M., Tungsten-ethylene vinyl acetate (EVA) composite as a gamma rays shielding material. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*. 2016. 54 (12), PP. 793–796.
- Seon-Chil Kim and Sung-Hyoun Cho. Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films. *Journals Applied Sciences*. 2019. 9(9). P. 1765. <https://doi.org/10.3390/app9091765>
- Джур Е.А., Санін А.Ф., Божко С.А., Андрианов А.Ю., Белоус В.А., Рыбка А.В., Захарченко А.А., Борисенко В.Н., Зиновьев А.М., Кузнецов А.П., Плиса Ю.В. Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов от ионизирующего излучения. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2013. № 6 (52). С. 126–131.
- Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Designing composite materials based on finely dispersed iron-containing substances for screening ionizing radiation

V. Glyva, I. Matvieieva, L. Levchenko, N. Kichata

**Abstract.** Based on an analysis of the scattering mechanisms of ionizing electromagnetic radiation and the dependence of radiation attenuation on the index number of the element and its density, it is concluded that it can be shielded by materials containing iron. The foundations of designing a composite metal-polymer material are proposed for reducing the intensity of x-ray and gamma radiation. It is shown that a change in the ionizing radiation absorption with a change in the radiation wavelength occurs nonmonotonically. Therefore, for the design of the material, it is necessary to find out the preferred wavelengths (frequencies) of radiation that require shielding. It has been established that for effective screening of radiation there is a critical concentration of metal particles in the polymer matrix. This occurs at the threshold of the flow of electric current when the content of the shielding substance is 11-12% (by weight). This is consistent with the electrodynamic ratios of continuous media. When designing a material using iron ore concentrate, its various properties should be taken into account, depending on the manufacturer. The design of the protective material should be preceded by laboratory studies to determine the overwhelming fraction of iron ore particles by the size and content of iron and its compounds in the feedstock.

**Keywords:** ionizing radiation, composite material, iron ore concentrate, shielding efficiency.

К. В. Данова

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна

## АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СТАНІВ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА З ІНВАЛІДНІСТЮ У КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ

**Анотація. Актуальність.** Ефективне використання трудового потенціалу є важливим у забезпеченні сталого розвитку підприємництва України, підвищення рівня його конкурентоспроможності та інвестиційної привабливості. У ситуації відтоку кадрів з металургійної, машинобудівної та інших галузей економіки, активізація та включення трудового резерву у виробничі процеси є необхідною передумовою розвитку економіки регіонів України. Одним з напрямів реалізації цього підходу є створення інклюзивного виробничого середовища та залучення на робочі місця працівників із інвалідністю. Важливу роль при цьому відіграє розробка та реалізація організаційно-технічних рішень по адаптації робочих місць та трудових процесів під можливості працівників із інвалідністю. Прийняття управлінських рішень стосовно адаптації робочих місць та урахування фізичного й психічного стану працівника мають ґрунтуватися на вивченні особливих потреб осіб із інвалідністю з метою попередження погіршення стану їх здоров'я та створення травмонебезпечної ситуації на робочому місці. **Мета.** Метою статті є аналіз особливостей функціональних станів людини-оператора із інвалідністю задля підвищення рівня ефективності та безпеки системи «людина – машина – виробниче середовище». **Методика дослідження.** Методика ґрунтується на аналізі функціональних станів осіб із інвалідністю у контексті ефективності та безпеки трудового процесу із застосуванням теорії ланцюгів Маркова для отримання математичних залежностей, що описують ймовірність знаходження людини-оператора з інвалідністю на певному рівні трудової активності. **Наукова новизна.** Полягає у розробці наукового підходу для дослідження функціональних станів працівника із інвалідністю задля попередження виникнення нещасного випадку чи створення аварійної ситуації на підприємстві. **Практичне значення.** Отримані математичні залежності дозволяють визначити ймовірність переходу працівника із інвалідністю у певний функціональний стан за наявності деградаційних процесів у системі «людина – машина – виробниче середовище», які можуть призвести до травматизму на робочому місці, а також процесів, що стабілізують систему та підвищують рівень безпеки. Це дає можливість визначити пріоритетні шляхи щодо вдосконалення стану охорони праці на робочому місці.

**Ключові слова:** працівник із інвалідністю, безпека, функціональний стан, ланцюги Маркова.

### Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями

Розвиток економіки безпосередньо пов'язаний із активізацією та включенням трудового потенціалу у виробничі процеси. Ефективне використання трудового резерву забезпечує сталий розвиток будь-якого підприємства, його конкурентоспроможність та інвестиційну привабливість. Складна соціально-економічна ситуація в країні обумовлює відтік кваліфікованих кадрів та нестачу трудових ресурсів у сфері виробництва.

За статистикою останніми роками спостерігається тенденція до зниження чисельності осіб, зайнятих у металургійній та машинобудівній сферах: у 2014 р. на металургійних підприємствах працювало 268,2 тис. осіб, а у 2018 р. – 193,6 тис. осіб; у сфері виробництва машин і устаткування чисельність працівників зменшилася з 354,7 тис. осіб до 304,5 тис. осіб [1]. У той же час спостерігається зростання кількості вакансій професіоналів, фахівців та кваліфікованих робітників, які працюють із інструментом.

Нестача кадрів призводить до зниження темпів розвитку економіки, зокрема у металургійній та машинобудівній сферах, які традиційно вважаються одними з пріоритетних напрямів розвитку економіки України.

У такій ситуації важливим питанням є реалізація програм, спрямованих на збереження трудових ресурсів та залучення на робочі місця трудові резер-

ви, які наразі залишаються поза сферою виробничої діяльності. Зараз в Україні налічується близько 2,5 млн. осіб із інвалідністю, при тому, що рівень їх трудової зайнятості складає близько 0,6 %. Структура інвалідності населення України виглядає наступним чином (рис. 1) [1].

З представлених даних видно, що 36 % - особи із інвалідністю II групи, 55 % - особи III групи інвалідності, які можуть бути задіяні у виробничому процесі у різних сферах економіки. Крім того, спостерігається тенденція до зростання чисельності осіб із інвалідністю серед дітей, які зараз внаслідок розвитку інклюзивного навчання мають можливість отримати повноцінну освіту та у подальшому реалізувати себе у професійній діяльності.

У вирішенні питання залучення осіб із інвалідністю на робочі місця важливу роль відіграє створення належних умов праці та адаптація робочих місць під можливості працівників із інвалідністю.

Розробка ефективних адаптаційних рішень базується на вивченні особливостей функціонального стану працівника із інвалідністю. Врахування існуючих обмежень життєдіяльності осіб із інвалідністю та створення відповідних цим потребам умов праці дозволяє сформувати інклюзивне виробниче середовище та підвищити ефективність використання трудових ресурсів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Функціональний стан людини, яка виконує операторські дії, у значній мірі обумовлює ефективність та безпеку трудових процесів.



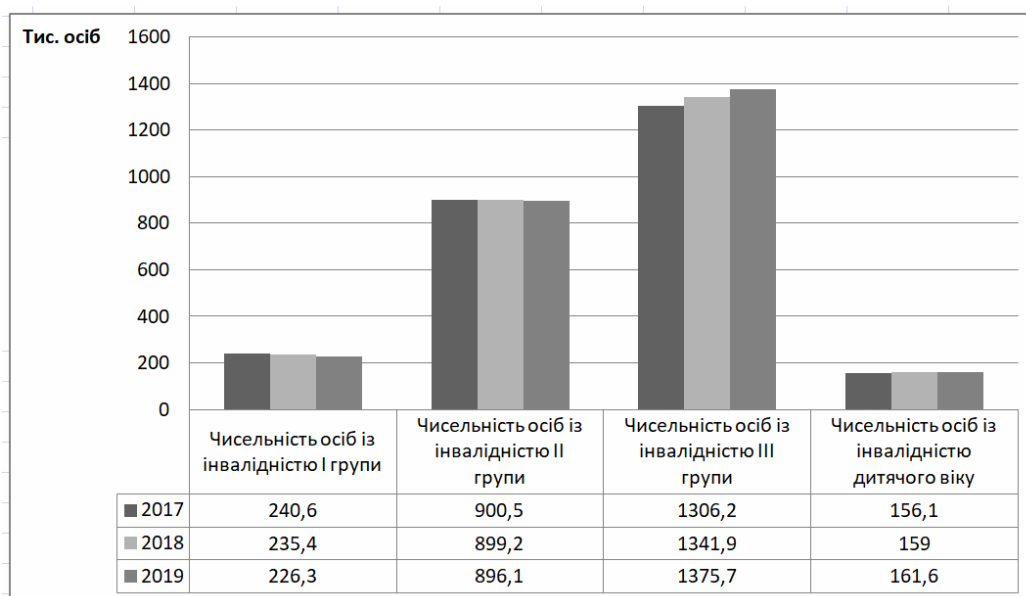


Рис. 1. Структура інвалідності населення України

Оцінка функціонального стану працівника без стійких порушень у стані здоров'я дозволяє розробити заходи щодо оптимізації трудового процесу з метою підвищення його ефективності.

У той же час дослідження функціонального стану особи із інвалідністю є необхідною умовою забезпечення як ефективності, так й безпеки праці на робочому місці [2].

У роботі [3] зазначається, що функціональний стан працівника є інтегральним показником його працездатності, що визначається індивідуальними особливостями, факторами виробничого середовища та трудового процесу.

Вплив індивідуальних особливостей на рівень безпеки обумовлюється рядом характеристик, основними з яких є: психофізіологічні характеристики людини; досвід, рівень освіти, професійні навички і способи виконання роботи; вік; тяжкість і напруженість праці, що впливають на накопичення втоми. В роботі [4] на базі аналізу впливу факторів трудового процесу на рівень травматизму зроблено висновок про переважання наступних причин: напруженості праці, обумовлена необхідністю забезпечення високого рівня продуктивності, втоми. Для працівників із інвалідністю ці причини набувають особливої актуальності внаслідок наявності стійких функціональних змін у стані здоров'я.

Відсутність ефективних механізмів щодо попередження реалізації небезпек, пов'язаних з людським фактором, призводить до збільшення ризику отримання травми і інших несприятливих наслідків.

В роботі [5] підкреслюється, що, незважаючи на значну вразливість працівників з інвалідністю, вони частіше працюють в несприятливих умовах, що збільшує ризик травматизму. Тому роботодавці повинні розробляти і впроваджувати чіткі процедури щодо зниження ризику травматизму працівників з інвалідністю із урахуванням їх функціонального стану.

**Мета дослідження.** Дослідити стани людини-оператора у системі «людина – машина - навколиш-

нє середовище», який має стійкі функціональні зміни у стані здоров'я, з метою розробки методів управління працездатністю та забезпечення належного рівня безпеки на робочому місці.

### Викладення матеріалу та результати

У контексті трудового процесу та вимог безпеки можна виділити наступні функціональні стани людини-оператора із інвалідністю (рис. 2):

1) працездатний стан  $S_1(t)$  – коли робоче місце та трудовий процес повністю враховують обмеження життєдіяльності працівника і дозволяють забезпечити рівень працездатності людини та виконання вимог безпеки на максимальному рівні;

2) працеспроможний стан  $S_2(t)$  – працівник здатний виконувати професійні обов'язки частково; вимоги, обумовлені трудовим процесом та охороною праці, виконуються не у повному обсязі внаслідок наявності невідповідностей між обмеженнями життєдіяльності працівника та роботи, що виконується;

3) стан готовності  $S_3(t)$  – працівник має потенціал щодо виконання професійних обов'язків (наприклад, після медичної реабілітації), але, внаслідок неналежного рівня імплементації адаптаційних рішень, є недостатньо задіяний у трудовому процесі;

4) стан раптової відмови  $S_4(t)$  – травма, інше ушкодження стану здоров'я внаслідок впливу факторів виробничого середовища та трудового процесу, які об'єктивно існують на робочому місці чи обумовлені невідповідністю робочого місця й трудового процесу можливостям працівника; 5) непрацездатний стан  $S_5(t)$  – особа, яка має інвалідність, знаходиться у працездатному віці, але є виключеною з трудового процесу внаслідок наявності значних функціональних обмежень, викликаних станом здоров'я, а також відсутності адаптаційних рішень, які могли б компенсувати невідповідності стану здоров'я людини вимогам робочого місця та трудового процесу.



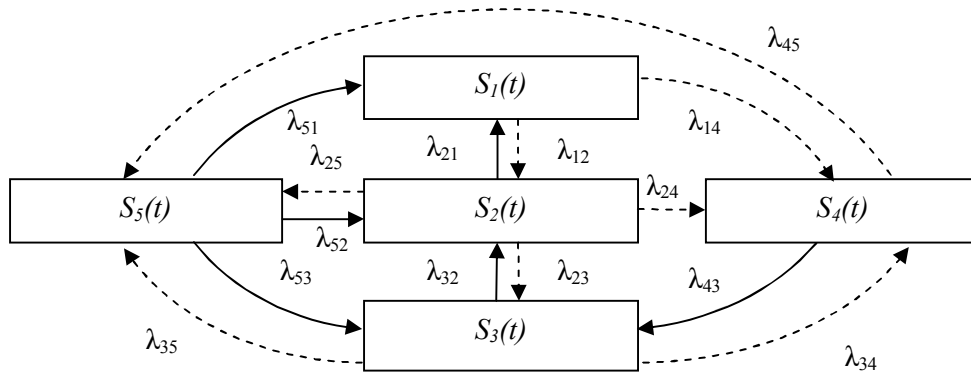


Рис. 2. Граф функціональних станів працівника із інвалідністю

Людина-оператор, яка має обмеження життєдіяльності, в аспекті виконання трудових обов'язків може знаходитися в одному з вищезазначених робочих станах. Для аналізу даних станів зазначимо два початкових (нульових) стани:

$S_{01}(t)$  – набуття стійких функціональних змін у стані здоров'я з дитинства, початок трудової діяльності людини відбувався у статусі особи із інвалідністю;

$S_{02}(t)$  – набуття інвалідності внаслідок нещасного випадку чи професійного захворювання на виробництві, або внаслідок травматизму невиробничого характеру.

Ці стани мають враховуватися при розробці та прийнятті управлінських рішень щодо вибору робочого місця для особи, якій встановлено інвалідність, з метою максимального врахування індивідуальних особливостей людини. Для цілей даного дослідження вважаємо, що  $S_{01}(t) = S_{02}(t) = S_5(t)$ .

Впровадження ефективних організаційно-технічних рішень задля переведення функціонального стану працівника із інвалідністю до працездатного є кінцевою метою реабілітаційних та адаптаційних заходів, оскільки такий стан дозволяє забезпечити максимальну ефективність та безпеку працівника, а, отже, матиме вагомий соціально-економічний ефект:

$$S_{01}(t) \rightarrow S_5(t) \rightarrow S_3(t) \rightarrow S_2(t) \rightarrow S_1(t); \quad (1)$$

$$S_1(t) \rightarrow S_4(t) \rightarrow S_{02}(t) \rightarrow S_3(t) \rightarrow S_2(t) \rightarrow S_1(t).$$

Працездатний стан  $S_1(t)$  для працівника, функціональний стан якого характеризується значними обмеженнями життєдіяльності, може бути ніколи не досягнутий.

Проте, навіть досягнення функціонального стану  $S_2(t)$  є вагомим результатом у напрямку забезпечення безпеки й ефективності трудової зайнятості осіб із інвалідністю.

Перехід з одного функціонального стану до іншого може здійснюватися внаслідок деградаційних процесів  $D(t)$ , які на рис. 1 позначені пунктиром, та процесів, що стабілізують стан  $C(t)$  (суцільна лінія).

Деградаційні процеси призводять до зниження ефективності й безпеки праці та здатні спричинити

погіршення стану здоров'я працівника із інвалідністю, призвести до травми, аварійної ситуації на об'єкті.

До цієї групи процесів належать:

- недостатній рівень організації трудового процесу;
- незадовільні санітарно-гігієнічні умови праці;
- відсутність чи низький рівень адаптації трудових процесів та робочих місць під можливості працівника із інвалідністю;
- незадовільний психологічний мікроклімат у колективі, брак розуміння важливості працевлаштування осіб із інвалідністю з боку керівництва та ін.

Процесами, що стабілізують ефективність й безпеку праці та сприяють підвищенню їх рівня є:

- належна оцінка рівня працездатності працівника із інвалідністю;
- розробка та впровадження адаптаційних організаційно-технічних рішень, які компенсують вади у стані здоров'я, забезпечують належний рівень працездатності та безпеки праці;
- створення санітарно-гігієнічних умов праці, які б дозволили зберегти стан здоров'я та працездатності працівника із інвалідністю на належному рівні із урахуванням наявних обмежень життєдіяльності;
- впровадження заходів по створенню у колективі атмосфери доброзичливості, попередження дискримінації та ін.

З метою управління ефективністю й безпекою праці особи із інвалідністю на робочому місці необхідно знати, у якому функціональному стані  $S_i(t)$  на даний момент знаходиться працівник, та які потрібні управлінські дії, щоб перевести його у інший стан  $S_n(t+T)$ .

Приймаємо:

- $P_i$  - ймовірність знаходження працівника з інвалідністю у певному функціональному стані;
- $\lambda_{ij}$  - щільність ймовірності переходу [6].

Використовуючи теорію ланцюгів Маркова, запишемо систему рівнянь для визначення ймовірності перебування працівника із інвалідністю у певному функціональному стані  $S_i(t)$ :

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{14})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{51}P_5(t);$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{32}P_3(t) + \lambda_{52}P_5(t);$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = -(\lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35})P_3(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{43}P_4(t) + \lambda_{53}P_5(t);$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = -(\lambda_{43} + \lambda_{45})P_4(t) + \lambda_{14}P_1(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t);$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = -(\lambda_{51} + \lambda_{52} + \lambda_{53})P_5(t) + \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{35}P_3(t) + \lambda_{45}P_4(t).$$

Задаючи значення щільності ймовірності переходу, виходячи з функціональних обмежень особи із інвалідністю, а також особливостей трудового процесу та виробничого середовища, можна визначити ймовірність знаходження працівника із інвалідністю у певному стані, що дозволить оцінити ефективність

адаптаційних рішень щодо підвищення рівня безпеки й ефективності трудової діяльності.

### Висновки

#### та напрямком подальших досліджень

Дослідження функціональних станів працівників, зокрема тих, які мають інвалідність, дозволяє визначити основні шляхи підвищення рівня ефективності трудової діяльності, а також попередження нещасних випадків на робочих місцях.

У статті проаналізовано функціональні стани, у яких може знаходитися людина-оператор із інвалідністю, та за допомогою теорії ланцюгів Маркова отримано рівняння, що характеризують ймовірність знаходження працівника із інвалідністю у певному функціональному стані за наявності деградаційних процесів та впливів, що стабілізують систему «людина – машина – виробниче середовище».

У подальшому дані рівняння можуть використовуватися у дослідженні ефективності заходів по забезпеченню безпеки й ефективності праці.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Праця в Україні у 2018 році / Статистичний збірник // Офіційний сайт Державної служби статистики України [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.
2. Данова К.В. Використання ланцюгів Маркова у дослідженні ризиків на робочому місці працівника із інвалідністю / К.В. Данова // Комунальне господарство міст. – Вип. 3 (149). – Х. : ХНУМГ, 2019. – С. 164-168.
3. Лис Ю.С., Солдатов О.В. Функціональний стан людини-оператора в системі управління охороною праці / Ю.С. Лис, О.В. Солдатов // Системи озброєння і військова техніка, 2016, № 3(47). – С. 133-136
4. Newman, S. M., Keefe, R. F., Brooks, R. H., Ahonen, E. Q., & Wempe, A. M. (2018). Human Factors Affecting Logging Injury Incidents in Idaho and the Potential for Real-Time Location-Sharing Technology to Improve Safety. *Safety (Basel, Switzerland)*, 4(4). P. 43. doi: <https://doi.org/10.3390/safety4040043>
5. F. Curtis Breslin, A. Morgan Lay, Arif Jetha & Peter Smith (2018) Examining occupational health and safety vulnerability among Canadian workers with disabilities, *Disability and Rehabilitation*, 40:18. P. 2138-2143. doi: <https://doi.org/10.1080/09638288.2017.1327985>.
6. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология 2-е изд. – М. : Наука, 1988. – 208 с.

Received (Надійшла) 26.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2020

### Analysis of the functional states of human-operator with disability in the aspect of occupational safety

K. Danova

**Abstract. The aim.** Effective use of work potential is important in ensuring of sustainable development of entrepreneurship in Ukraine, increasing its competitiveness and investment attractiveness. In a situation of an outflow of personnel from the metallurgical, engineering and other sectors of the economy, the activation and inclusion of the work reserve in production processes is the key to the sustainable development of economic sectors. One of the directions for implementing this approach is to involve the employees with disabilities to the workplaces. An important role in solving this issue is the creation of appropriate working conditions and the adaptation of workplaces to the capabilities of workers with disabilities. Making managerial decisions to adapt workplaces to the capabilities of the employee, taking into account his physical and mental state, should be based on the studying of the characteristics of the conditions of persons with disabilities that are included in the work process in order to prevent the worsening of their health and creation of traumatic situation. The aim of the article is to analyze the features of the functional states of a person-operator with a disability in order to increase the efficiency and safety level of the “man-machine-production environment” system. **Research Methodology.** The methodology is based on the analysis of the functional states of persons with disabilities in the context of the efficiency and safety of the work process using the Markov chains theory to obtain mathematical dependencies that describe the probability of a person-operator with disabilities staying in a certain functional state. **Scientific novelty.** It consists in developing a scientific approach to studying the functional conditions of a worker with a disability to prevent an accident or creation of an emergence situation at the enterprise. **Practical value.** The obtained mathematical dependences make it possible to determine the probability of transitioning of a worker with a disability to a certain functional state in the presence of degradation processes in the “man – machine – production environment” system that can lead to injuries at the workplace, as well as processes that stabilize the system and increase the safety level. This makes it possible to identify priority ways to improve the state of occupational safety at the workplace.

**Keywords:** worker with disability, safety, functional state, Markov chains.

Н. В. Касаткіна<sup>1</sup>, О. М. Тихенко<sup>2</sup>, О. М. Фурсенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>3</sup> Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Київ, Україна

## РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ІЗ ЗАДАНИМИ ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

**Анотація.** На сьогоднішній день основна частина досліджень та прикладних розробок щодо розроблення матеріалів для екранування електромагнітних полів різних частотних діапазонів є експериментальними, особливо це стосується сучасних композиційних матеріалів. Встановлено, що актуальною є задача вироблення раціональної методології розрахункового прогнозування ефективності матеріалів для екранування електромагнітних полів. Мета роботи – надання зручного у використанні розрахункового апарату для прогнозування захисних властивостей матеріалів для екранування електромагнітних полів, що дозволить мінімізувати обсяги експериментальних робіт під час проектування захисних конструкцій. Наведено, виходячи з фундаментальних співвідношень електродинаміки суцільних середовищ, зручні у використанні залежності коефіцієнтів екранування металевих та композиційних матеріалів від їх геометричних, магнітних та електрофізичних властивостей. Обґрунтовано співвідношення щодо визначення внеску відбиття електромагнітних хвиль у загальний коефіцієнт екранування. Це дозволяє розрахувати товщину електромагнітного екрана на принципах розумної достатності. Показано, що для ефективного використання розрахункових методів оцінювання захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування магнітних та електромагнітних полів потрібна наявність надійних експериментальних даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей найбільш поширених за складом композиційних матеріалів.

**Ключові слова:** електромагнітне поле, екранування, композиційні матеріали, коефіцієнт екранування, електромагнітний екран.

### Вступ

Переважає більшість досліджень та прикладних розробок щодо розроблення матеріалів для екранування електромагнітних полів різних частотних діапазонів є експериментальними. Особливо це стосується сучасних композиційних матеріалів. Значною мірою це обумовлене відсутністю довідкових даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей таких матеріалів, що є обов'язковим для використання розрахункових методів. Більшість аналітичних методик стосуються металевих захисних матеріалів для яких існують табличні дані для розрахунків. Але наявність експериментальних даних щодо коефіцієнтів екранування композиційних матеріалів для різних частот та частотних смуг електромагнітних полів дозволяє адаптувати існуючий математичний апарат до сучасних задач оцінювання та прогнозування захисних властивостей композитів різного складу та технологій виготовлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ґрунтовні довідкові й наукові джерела щодо розрахункових методів визначення ефективності магнітних та електромагнітних екранів [1, 2] розглядають виключно металеві екрани. До того ж вони стосуються саме екранів різної форми, не екрануючих матеріалів. У роботі [3] надано придатні для використання фахівцями з цивільної безпеки співвідношення для визначення коефіцієнтів екранування, але вони також розглядають металеві матеріали. В останні роки набули розвитку чисельні методи визначення потрібних параметрів захисних матеріалів [4, 5]. Ці роботи стосуються тільки тонких оболонок у високочастотних електромагнітних полях. У дослідженні [6] визначено модельними методами та

числовим експериментом ефективність шару магнітної рідини. Практичного застосування це не має через неможливість виробити матеріал з чистої рідини. Але властивості магнітної рідини (достатня магнітна проникність, висока дисперсність екрануючих частинок) роблять її перспективним матеріалом для вироблення екрануючого матеріалу, що підтверджено у [7]. У цій роботі на основі експериментальних даних щодо коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти розраховано зміну ефективної магнітної проникності матеріалу, яка є головним показником щодо захисних властивостей матеріалу.

Таким чином, актуальною є задача вироблення найбільш раціональної методології розрахункового прогнозування ефективності матеріалів для екранування електромагнітних полів.

**Постановка завдання.** Мета роботи – надання зручного у використанні розрахункового апарату для прогнозування захисних властивостей матеріалів для екранування електромагнітних полів, що дозволить мінімізувати обсяги експериментальних робіт під час проектування захисних конструкцій.

### Виклад основного матеріалу

Відомо, що зміна напруженостей магнітного та електричного полів у тілі металевого матеріалу відбувається за експоненціальним законом:

$$H_1 = H_0^{-\lambda d},$$

$$E_1 = E_0^{-\lambda d},$$

де  $H_0, E_0$  – напруженості магнітного та електромагнітного полів у повітрі;  $H_1, E_1$  – напруженості полів

у товщі металу;  $d$  – товщина матеріалу;  $\lambda$  – коефіцієнт згасання поля.

У свою чергу

$$\lambda = \sqrt{\pi f \mu \sigma},$$

де  $f$  – частота екранованого поля;  $\mu$  – абсолютна магнітна проникність матеріалу;  $\sigma$  – питома проникність матеріалу.

Як видно, для визначення зміни напруженостей магнітного та електричного полів необхідні дані про магнітні та електричні властивості матеріалів. Для переважної більшості металевих матеріалів ці дані є табличними й представлені у довідкових джерелах. Наведені співвідношення можливо застосовувати для композиційних матеріалів, які не є діелектриками.

На сьогоднішній день для багатьох композиційних матеріалів такі дані отримані експериментально. Наприклад у роботі [8] наведено зміну питомої провідності металополімерного композиту на основі латексу та залізородного пилу: за зміни концентрації такого пилу у полімерній матриці з 10 до 17 % питома провідність змінюється з  $5 \cdot 10^{-7}$  См/м до 6 См/м. У дослідженні [9] наведені дані про зміну діелектричної проникності металополімерів на основі залізородного пилу з таким же вмістом наповнювача у межах 12–100. Ці дані надають змогу отримати усі необхідні для оцінювання розрахунків кількісні значення для хвильового поля:

$$\varepsilon(\omega) = i \frac{4\pi\sigma}{\omega}, \quad (1)$$

де  $\omega$  – колова частота електромагнітного поля за  $\mu=1$ ,  $n^2 - \psi + 2in\psi = \varepsilon' + i\varepsilon''$ , де  $n$  – коефіцієнт заломлення електромагнітної хвилі у матеріалі;  $\psi$  – коефіцієнт поглинання середовища (швидкість затухання хвилі при її розповсюдженні у матеріалі),  $\varepsilon'$  – дійсна, а  $\varepsilon''$  – уявна складові комплексної діелектричної проникності.

Для провідних матеріалів, у області частот, що відповідають умові (1), уявна складова  $\varepsilon$  велика порівняно з дійсною і має значення

$$\varepsilon'' = \frac{4\pi\delta}{\omega},$$

Нехтуючи  $\varepsilon'$  порівняно з  $\varepsilon''$ , у відповідності до відомих співвідношень:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}}, \quad \psi = \sqrt{\frac{-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}},$$

маємо  $n = \psi = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\omega}}$ .

При цьому виконується фундаментальне співвідношення  $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ .

При виборі товщини екрана необхідно брати до уваги еквівалентну глибину проникнення  $\delta$  високо-частотного поля у товщу матеріалу екрана:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}.$$

Це глибина, на якій поле знижується у  $e = 2,7$  рази (8,7 дБ).

Фактична глибина проникнення залежить від потрібного коефіцієнта екранування. За зниження рівня поля у 100 разів фактична глибина складає  $4,6\delta$ , у 10 разів –  $2,3\delta$ .

У багатьох випадках необхідно з'ясувати внесок відбиття у загальний коефіцієнт екранування. Ефективність екранування (коефіцієнт екранування) за рахунок відбиття електромагнітних хвиль на межі розділу повітря – екран обумовлена відмінністю хвильового опору повітря  $Z_n$  й характеристичного опору матеріалу екрана  $Z_e$ . Ефективність екранування через відбиття електромагнітних хвиль:

$$K_b = 20 \lg \frac{Z_n}{4Z_e},$$

де  $Z_n$  (у ближній зоні відносно електричного та магнітного полів) визначається зі співвідношення:

$$Z_n = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\varepsilon}},$$

де  $\varepsilon$  – абсолютна діелектрична проникність повітря.

Для однорідних провідних матеріалів  $\delta > i\omega\varepsilon$ , тому

$$Z_e = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}}.$$

Наведене свідчить, що коефіцієнти відбиття не залежать від товщини екрана.

Ефективність екранування магнітного поля та магнітної складової електромагнітного поля залежить від ефективної магнітної проникності екрануючого матеріалу. Для композиційних матеріалів магнітну проникність можливо визначити експериментальними методами. У роботах [7, 9] надані розрахунки щодо визначення коефіцієнта екранування квазістаціонарного магнітного поля циліндричним та сферичним екранами відомих радіусів та товщини стінок:

$$K_{\psi} = \frac{\mu_{eff} (b^2 - a^2)}{4b^2}; \quad (2)$$

$$K_{e\phi} = \frac{(2\mu_{eff} + 1)(\mu_{eff} - 2) - 2(\mu_{eff} - 1)^2 a^3/b^3}{9\mu_{eff}}, \quad (3)$$

де  $a$  і  $b$  відповідно внутрішні та зовнішні радіуси екранів.

Експериментально визначаючи коефіцієнти екранування, можна розрахувати ефективну магнітну проникність матеріалу.

При визначенні необхідної та достатньої товщини електромагнітного екрана важливим показником є погонне ослаблення поля захисним матеріалом, яке можна визначити зі співвідношення:

$$\tau = \left[ \tau_1 - 10 \lg \left( \frac{1}{1 - K_b} \right) \right] d,$$

де  $\tau$  – погонне ослаблення, дБ/мм;  $\tau_1$  – ослаблення електромагнітної хвилі, дБ;  $K_b$  – коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від матеріалу на відповідній частоті;  $d$  – товщина зразка, мм.

При визначенні ефективності перфорованих екранів виникають дві основні задачі: розрахунок частоти зрізу та ефективності поглинання частки випромінювання частот, нижчих за частоту зрізу. Суперечності у даному випадку немає через обов'язкову часткову проникність екрана внаслідок дифракційних явищ. Взагалі такі розрахунки досить складні, але існують спрощені напівемпіричні співвідношення, цілком прийнятні для вирішення прикладних задач.

Так частота зрізу для круглого отвору визначається зі співвідношення:

$$f_3 = \frac{1,75 \cdot 10^5}{d}, \text{ МГц}$$

де  $d$  – діаметр отвору, мм.

Відповідно втрати енергії випромінювання на поглинання визначаються як:

$$K_n = 32 \frac{a}{d}, \text{ дБ}$$

де  $a$  – товщина стінки екрана, мм.

Наведене співвідношення впливає з теорії хвилеводів. При цьому величину  $a$  можна вважати довжиною хвилеводу.

Розглянуті формули визначалися для використання у радіотехніці.

Як зазначено у [10] вони розглядають частоту зрізу як частоту до якої хвилевод послаблює певною мірою інтенсивність електромагнітних хвиль, що є не зовсім прийнятним з точки зору охорони праці [11].

Для визначення ступеня захисту необхідно знати частоту випромінювань нижче якої отвори можна вважати повністю непроникними для випромінювання. Хоча у будь-якому випадку за наявності багатьох отворів у конструкції вони є поза межними хвилеводами.

Тому для використання такого ефекту у галузі електромагнітної безпеки доцільно використовувати співвідношення:

$$f_3 = \frac{1,8 \cdot 10^4}{d},$$

де  $f_3$  – частота зрізу, МГц;  $d$  – діаметр отвору, мм.

Розрахунки з використанням цього співвідношення показали, що отвори стають непроникними для випромінювання за їх діаметрів або довжин хвиль (для прямокутного отвору), які дорівнюють приблизно 0,1 довжини падаючої електромагнітної хвилі.

Це добре узгоджується з експериментальними дослідженнями і має практичне значення.

Значення коефіцієнта екранування можна визначити зі співвідношення довжини падаючої хвилі і максимальної довжини отвору:

$$K_e = 20 \lg \left( \frac{\lambda}{2d} \right).$$

Слід зауважити, що визначення  $K_e$  виходячи з діаметра і довжини хвилевода використовується тільки для частот нижчих за частоту зрізу.

Найбільш перспективним напрямом робіт зі зниження відбивальних властивостей електромагнітних екранів, на нашу думку може бути, оптимізація співвідношень магнітних та електричних параметрів.

Хвильовий опір непровідного матеріалу  $Z$  визначається як:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}},$$

де  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу;  $\epsilon$  – діелектрична проникність.

Обираючи  $\mu$  та  $\epsilon$  таким чином, що  $Z$  буде дорівнювати опору вільного простору ( $Z_0 = 377$  Ом), ми забезпечимо проходження границі розділу «вільний простір - екран» без відбиття. При цьому металеві включення у матриці повинні забезпечити максимальне поглинання електромагнітної енергії, що визначає загальний коефіцієнт екранування.

Однак у реальних виробничих умовах такі процеси складніші. Відомо, що для кутів падіння хвиль, відмінних від нормального, коефіцієнт відбиття суттєво змінюється. Розглянемо частоту випромінювання разом з діелектричною проникністю і провідністю матеріалу, тобто зведену частоту  $\Omega$ :

$$\Omega = \frac{f \cdot \epsilon}{\sigma},$$

де  $f$  – частота випромінювання;  $\epsilon$  – діелектрична проникність матеріалу;  $\sigma$  – провідність матеріалу.

За різних значень  $Z$  виявляється, що мінімальний коефіцієнт відбиття спостерігається за  $Z=0,5$ . При цьому прийнятні коефіцієнти відбиття (0,2 і менше) спостерігаються для  $Z=0,5$  і  $\Omega > 1$ .

У загальному випадку, за великої товщини екрана необхідно враховувати фактор багатократного відбиття на границях розділу середовищ. Втрати на перевідбиття визначаються показником  $K_{nb}$ . У більшості випадків цим показником нехтують, але для більш точного визначення загального коефіцієнта екранування він визначається зі співвідношення:

$$K_{nb} = 20 \lg \left( 1 - e^{-2l\sqrt{\pi f \mu \sigma}} e^{-j2l\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \right),$$

де  $l$  – товщина екрана, м;  $f$  – частота, Гц;  $\mu$  – абсолютна магнітна проникність, Гн/м;  $\sigma$  – провідність матеріалу екрана, См/м.

Як видно, в усіх випадках, навіть для оцінювання захисних властивостей матеріалів необхідно мати експериментальні дані щодо магнітних та електрофізичних характеристик матеріалів.

З використанням (2), (3) та програмних засобів Comsol отримані апроксимації щодо ефективної магнітної проникності композиційних металополімерних матеріалів з рівномірним розподілом ферромагнітних частинок у полімерній матриці. Але для більшості композиційних матеріалів такі дані поодинокі і не дозволяють застосовувати їх для матеріалів іншого складу. Тому для можливості визначення потрібних параметрів матеріалів розрахунковими методами доцільно провести серію експериментальних досліджень щодо типових компонентів, що дозволить створити базу даних необхідних для розрахунків кількісних значень щодо складу та магнітних й електрофізичних параметрів захисних матеріалів.

### Висновки

1. Виходячи з фундаментальних співвідношень електродинаміки суцільних середовищ, надано

зручні у використанні залежності коефіцієнтів екранування металевих та композиційних матеріалів від їх геометричних, магнітних та електрофізичних властивостей.

2. Надано співвідношення щодо визначення внеску відбиття електромагнітних хвиль у загальний коефіцієнт екранування та визначення поганого ослаблення електромагнітного поля у товщі екрана. Це дозволяє розрахувати товщину електромагнітного екрана на принципах розумної достатності.

3. Показано, що для ефективного використання розрахункових методів оцінювання захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування магнітних та електромагнітних полів потрібна наявність надійних експериментальних даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей найбільш поширених за складом композитів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аполлонский С. М. Справочник по расчёту электромагнитных экранов. 1998. 224 с.
2. Резинкина М. М. Использование численных расчётов для выбора средств экранирования от действия магнитных полей. *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77. № 11. С. 17–24.
3. Назаренко М. В., Гончарова О. М., Панова О. В. Розрахункові методи визначення захисних властивостей електромагнітних екранів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2012. Вип. 23. С. 84–89.
4. Громыко Г. Ф., Ерофеев В. Т., Заяц Г. М. Численное исследование структуры магнитного поля в цилиндрическом пленочном экране. *Информатика*. 2015. № 2. С. 5–18.
5. Lavrova O., Polevikov V., Tobiska L. Modeling and simulation of magnetic particles diffusion in a ferrofluid layer. *Magneto hydrodynamics*. 2016. Vol. 52. № 4. P. 417–430.
6. Полевиков В. К., Ерофеев В. Т. Численное моделирование взаимодействия магнитного поля с цилиндрическим слоем магнитной жидкости. *Информатика*. 2017. № 2(54). С. 5–14.
7. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>
8. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>
9. Glyva V., Podkopaev S., L. Levchenko, N. Karaieva, K. Nikolaiev, O. Tykhenko, O. Khodakovskyy, B. Khalmuradov. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, Iss. 1/5 (91). PP. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123622>
10. Демский Д. В. Метод расчета эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14 / Демский Дмитрий Викторович. М., 2014. 114 с.
11. Коваленко В. В., Глива В. А., Тихенко О. М., Лук'яненко С. О. Розрахункові методи визначення захисних властивостей електромагнітних екранів у дальній зоні електромагнітного поля. Системи обробки інформації. 2016. № 7 (144). С. 55–57.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Computational methods of design of electromagnetic screens with predefined protective properties

N. Kasatkina, O. Tykhenko, O. Fursenko

**Abstract.** To date, most of the research and design works on the development of materials for shielding electromagnetic fields of different frequency ranges is based on experiments, and it is especially true for modern composites. It is established that there is a need to develop rational methodology for the calculation of the efficiency of materials for shielding electromagnetic fields. The purpose of this work is to provide an easy-to-use calculator for predicting the protective properties of materials for shielding electromagnetic fields, which will minimize the amount of experimental work during the design of protective structures. Based on the fundamental relationships between the electrodynamics of continuous media, the usable dependences of the shielding coefficients of metallic and composite materials on their geometric, magnetic, and electrophysical properties are provided. The equation for determining the contribution of the electromagnetic waves reflection to the total shielding factor is substantiated. This makes it possible to calculate the thickness of the electromagnetic screen based on the principles of reasonable sufficiency. It is shown that the effective use of the computational methods for evaluating the protective properties of composite materials for shielding magnetic and electromagnetic fields requires reliable experimental data on the magnetic and electrophysical properties of the most common composite materials.

**Keywords:** electromagnetic field, shielding, composite materials, shielding factor, electromagnetic screen.

О. О. Мікосянчик, Н. М. Кічата, Т. М. Савицька, Д. А. Рігус

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## АНАЛІЗ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА РОЗРОБКА ПРОФІЛАКТИЧНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ЇЇ ЗНИЖЕННЯ НА СПЕЦІАЛІЗОВАНІЙ ДІЛЬНИЦІ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

**Анотація.** Для зменшення кількості надзвичайних ситуацій унаслідок аварій чи катастроф на транспорті важливими факторами є своєчасний ремонт деталей автомобілів, а також безпека технологічних процесів під час їх виконання. В даній роботі досліджено технологічний процес ремонту деталей автомобілів та виявлено небезпечні чинники на виробництві. Із застосуванням методів попереднього аналізу небезпек та дерева відмов визначено імовірність появи потенційних небезпек на спеціалізованій дільниці по відновленню двигунів внутрішнього згоряння та спрогнозовано наслідки, до яких вони можуть призвести. Запропоновано заходи щодо встановлення на спеціалізованій дільниці припливно-витяжної вентиляційної системи з метою підвищення якості очищення повітря. Надамо пропозиції та рекомендації щодо розробки профілактичних заходів, направлених на зниження рівня пожежної небезпеки на спеціалізованій дільниці відновлення головок блоків циліндрів двигунів внутрішнього згоряння.

**Ключові слова:** ремонт, потенційні небезпеки, технологічний процес, попередній аналіз небезпек, дерево відмов, протипожежний захист.

### Вступ

В процесі експлуатації автомобілів, технологічного обладнання та інших механізмів їх надійність та довговічність знижуються внаслідок зношування деталей, корозії, втомленості, старіння матеріалу й інших процесів, які викликають появу несправностей та різних дефектів, усунення яких є необхідним для підтримання цих механізмів в працездатному стані.

Технічне обслуговування та ремонт автомобілів за технічним станом ґрунтуються на глибокому знанні показників надійності елементів автомобіля, застосуванні об'єктивних засобів технічної діагностики, забезпеченні високого рівня експлуатаційної технологічності констукцій. Інформаційною основою цих методів є відомості про надійність, технічний стан та експлуатаційні витрати на технічне обслуговування і ремонт автомобілів [1].

Технологічний процес ремонту (відновлення) деталей являє собою частину виробничого процесу, пов'язаного зі зміною стану деталі (геометричної форми, розмірів, якості поверхні та ін.) і включає в себе підготовку деталі до процесу відновлення (нанесення покриття і т. п.), власне відновлення (нанесення покриття, наплавка і т. п.) і необхідні операції по обробці і перевірці на відповідність відновленої деталі вимогам технічної документації.

Тому актуальною є задача оцінки рівня безпеки технологічних процесів відновлення та ремонту деталей, аналіз небезпечних чинників технологічних операцій та прогнозування наслідків та імовірності виникнення надзвичайної ситуації на виробництві.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В автотранспортному комплексі (АТК) України склались складні умови щодо забезпечення системної ефективності автотранспортних засобів в процесі експлуатації, викликані значною зміною структури рухомого складу, низьким рівнем організації виробництва і праці на підприємствах АТК, зниженням обсягів виконуваних ремонтних робіт, неефективною реалізацією існуючої концепції організації та технології ремонту транспортних засобів [2].

Відомо, що експлуатація рухомого складу автомобілів призводить до зміни його технічного стану і зростання імовірності виникнення дефектів пошкоджень, відмов, поломок, наслідком яких можуть бути порушення графіків перевезення пасажирів, вантажів, забруднення навколишнього середовища, пошкодження вантажів, а в окремих випадках, за несприятливого збігу обставин, і дорожньо-транспортні пригоди зі значними матеріальними втратами [3]. Виробники автомобілів закладають певний ресурс роботи двигуна до капітального ремонту. В середньому цей показник близько 150-200 тис. км пробігу. До того ж на даний показник істотно впливають якість обслуговування, стан палива, своєчасність заміни моторної оливи. Таким чином, ресурс двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) не тільки можна збільшити, але й значно скоротити [1]. Відновлені деталі повинні відповідати вимогам технічних умов і робочих креслень заводів-виготовлювачів автомобілів, агрегатів, вузлів, механізмів. Виконання відновлюваних робіт вимагає складних, сучасних технологій, і як правило, проводиться у спеціалізованих підприємствах. Авторемонтні підприємства відносяться до спеціалізованих виробництв і призначені для відновлення ресурсу роботи окремих агрегатів або повнокомплектних автомобілів [4, 5]. Основною проблемою, яка постає при ремонті та відновленні деталей, це зношеність обладнання, відсутність великих спеціалізованих підприємств, створення малих та середніх спеціалізованих дільниць, які потребують додаткового аналізу безпеки технологічних процесів, які вони запроваджують.

**Постановка завдання.** Мета роботи – розробка профілактичних заходів щодо підвищення рівня протипожежного стану на спеціалізованій дільниці ремонту автомобільних деталей, а також обґрунтування важливості дотримання безпеки у технологічних процесах відновлення деталей двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ).

### Виклад основного матеріалу

Загальна схема технологічного процесу на спеціалізованій дільниці представлена на рис. 1.



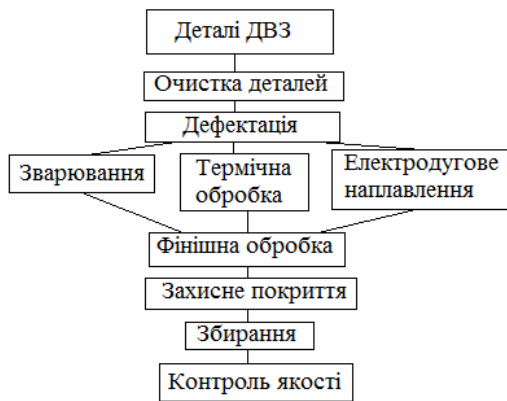


Рис. 1. Схема технологічного процесу відновлення головки блоку циліндрів ДВЗ

Розглянемо основні операції технологічного процесу відновлення деталей ДВЗ. Перед ремонтом агрегати, вузли і деталі знежирюють і промивають. Деякі деталі очищають від іржі, накипу і нагару. Більшість очисних операцій виконуються у рідких середовищах, які руйнують і видаляють забруднення, що мають адгезійний зв'язок з поверхнею, та переводять їх у миоче середовище у вигляді розчинів, емульсій або суспензій. Забруднення видаляють струминним і заглибним способами, а також їх комбінацією.

На ремонтних підприємствах застосовують синтетичні миючі засоби (СМЗ), органічні розчинники (ОР), розчинно-емульгуючі засоби (РЕЗ) і кислотні розчини [6].

Процес миття у розчинах СМЗ супроводжується піноутворенням, яке у більшості випадків є негативним фактором, оскільки обмежує використання інтенсивного перемішування, тобто знижує інтенсивність процесу емульгування і диспергування, заважає роботі насосів струминних установок. Для усунення піноутворення на ремонтних підприємствах застосовують дизельне паливо, гас, уайтспірит (0,2—0,3 % об'єму розчину) [7].

Більш ефективні за очищувальною здатністю хлоровані вуглеводні, але вони через високу токсичність застосовуються лише у випадку наявності спеціальних установок, які працюють за замкнутим циклом, із строгим дотриманням всіх вимог безпеки.

Розчинно-емульгуючі речовини являють собою миючі композиції із розчинника і ПАР. Вони розчиняють і одночасно емульгують забруднення. Такі засоби сприяють швидкому видаленню міцних, наприклад смолистих відкладень.

Внаслідок того, що в технологічній операції застосовують розглянуті речовини, необхідно вживати додаткових заходів щодо зниження імовірності виникнення пожежі на спеціалізованій дільниці. Насамперед, необхідний контроль щодо належного зберігання легкозаймистих речовин, наявність в приміщенні припливно-витяжної вентиляційної системи, контроль ГДК шкідливих речовин в приміщенні.

На спеціалізованій дільниці по ремонту для електродугового напилення покриттів при відновленні розмірів зношених деталей використовують

стаціонарний ЕДН-8 і ручний ЕДН-10 апарати для електродугового напилення, які поєднали в собі переваги електродугового і високошвидкісного газотермічного напилення. Головною відмінною рисою установок ЕДН є наявність малогабаритної високоєфективної камери згоряння, яка працює на пропан-повітряній суміші. Газоподібне паливо в порівнянні з рідким паливом відносно дешеве, легко змішуються з повітрям, а відпрацьовані гази малотоксичні. Пропан характеризується високим коефіцієнтом об'ємного розширення: при підвищенні температури на 10°С тиск в газовому балоні підвищується на 0,6-0,7 МПа. За енергетичним параметрам 1 м<sup>3</sup> природного газу еквівалентний 1 л бензину. Відсутність кисню в якості окислювача палива значно знижує собівартість нанесених покриттів і підвищує надійність і безпеку проведених робіт. Використання пропан-повітряної суміші в якості транспортування газу значно знижує окислення напилюючого металу і вигорання легуючих елементів. Головною відмінною рисою установок ЕДН є наявність малогабаритної високоєфективної камери згоряння, яка працює на пропан-повітряній суміші. Газоподібне паливо в порівнянні з рідким паливом відносно дешеве, легко змішуються з повітрям, а відпрацьовані гази малотоксичні. Пропан характеризується високим коефіцієнтом об'ємного розширення: при підвищенні температури на 10° С тиск в газовому балоні підвищується на 0,6-0,7 МПа. За енергетичним параметрам 1 м<sup>3</sup> природного газу еквівалентний 1 л бензину. Відсутність кисню в якості окислювача палива значно знижує собівартість нанесених покриттів і підвищує надійність і безпеку проведених робіт. Використання пропан-повітряної суміші в якості транспортування газу значно знижує окислення напилюючого металу і вигорання легуючих елементів.

Оцінювання небезпеки включає визначення ймовірності її появи, а також розгляд наслідків, до яких вона може призвести (серйозність травм, пошкоджень систем, наземних об'єктів і ін. складових виробництва, а також екологічні збитки). При аналізі небезпек необхідно розробити проект контрзаходів (тобто заходів щодо їх усунення або локалізації) стосовно кожної з встановлених небезпек.

Метою попереднього аналізу небезпек (ПАН) є визначення складу системи, її частини або окремого елемента, виявлення потенційних небезпек або небезпечних станів, які можуть створювати система або її елементи в ході роботи і які можуть призвести до небезпечних подій, тобто визначення тієї частини системи, де потрібно провести більш детальний аналіз.

Оскільки одні частини системи становлять більшу небезпеку, ніж інші, на самому початку аналізу слід розбити систему або технологічний процес на підсистеми (етапи). На основі структури якісного дослідження ПАН розглянемо ситуацію 1 стосовно експлуатації резервуара пропан-бутанової суміші (для технологічної операції електродугового напилення) та спрогнозуємо ситуацію 2 при процесі очищення деталей від нагару та забруднення у резервуарі з легкозаймистою речовиною (для технологічної операції підготовки деталей до ремонту) (табл. 1).

Таким чином, результати ПАН свідчать про наявність потенційних небезпек в технологічному процесі відновлення деталей ДВЗ, які можуть призвести до аварійних ситуацій «пожежа / вибух», що призведуть до III критичного стану прояву небезпек - стан, пов'язаний з помилками персоналу, недоліками конс-

трукції або її невідповідністю проектній документації, а також неправильним її функціонуванням, який призводить до істотних порушень в роботі, пошкодження обладнання та створює небезпечну ситуацію, що вимагає негайних заходів з порятунку персоналу та обладнання.

Таблиця 1 - Оцінка потенційних аварій методом ПАН

№	Структура якісного аналізу	Ситуація 1	Ситуація 2
1	Система, підсистема або елемент	Резервуар для зберігання газу	Резервуар для зберігання легкозаймистих речовин
2	Ситуація	Технологічний процес наплавки	Процес очищення деталей від нагару та забруднення
3	Небезпечний елемент	Суміш газу пропан-бутан	Легкозаймисті та летючі речовини
4	Причина, що обумовлює небезпечний стан	Несправність випускного клапану	Розтікання легкозаймистої речовини
5	Небезпечні умови	Можливість інтенсивного витоку газової суміші	Випаровування легкозаймистих речовин
6	Подія, що обумовлює небезпечні умови	Теплове джерело – іскра (виникає при технологічному процесі електродугового напилення)	Надлишковий тиск летючих речовин у повітрі, до 5 кПа, джерело температури – іскра
7	Потенційна аварія	Вибух	Пожежа
8	Наслідки	Поранення персоналу, пошкодження будівлі	
9	Клас безпеки	III – критичний	
10	Заходи для запобігання аварії	Контроль технологічного стану клапану резервуару, контроль роботи припливно/ витяжної вентиляції. Встановлення датчика, який реагує на концентрацію пропану, бутану в повітрі	Використання ємностей для зберігання, розміщення їх на достатній відстані від іншого устаткування і персоналу

Розглянемо потенційну небезпеку типу «пожежа», яка може виникнути на ділянці ремонту ДВЗ, побудувавши дерево відмов. Для цього виділимо небезпечні ситуації та чинники, які призводять до їх появи та обчислимо імовірність прояву потенційної небезпеки на об'єкті.

Рівень 1. Пожежа

Рівень 2. Помилка персоналу АБО корозія/знос резервуару для зберігання пропан-бутанової суміші, АБО наявність легкозаймистих речовин, АБО коротке замикання електроінструменту.

Рівень 3. Низька кваліфікація персоналу АБО порушення цілісності резервуару внаслідок розгерметизації, АБО розтікання легкозаймистих речовин (ЛЗР), АБО вплив технологічного процесу електродугового напилення на ймовірність підвищення температури, АБО пробої ізоляції електрообладнання внаслідок дії зовнішніх чинників ТА наявність джерела температури.

Рівень 4. Паління на робочому місці при недотриманні правил внутрішнього розпорядку/ порушення особою техніки безпеки або недотримання вимог технологічних процесів на об'єкті, що призводить до розливу ЛЗР або недотримання належної концентрації ЛЗР при приготуванні розчинів/ попадання води в резервуар зберігання ЛЗР/ відсутність контролю якості резервуарів для зберігання ЛЗР/ утворення в повітрі горючого пилу в зваженому стані/ підвищена вологість повітря, яка посилює корозійне зношування обладнання (нероботоздатний стан припливно-витяжної вентиляції).

Для розрахунку імовірності виникнення пожежі на ділянці по ремонту та відновленню двигуна внутрішнього згоряння, проаналізувавши імовірність ви-

никнення та прояву чинників на розглянутому рівні 4, прийнемо:

- імовірність 0,001 прийняти для витоку газу;
- імовірність 0,02 прийняти для: паління на робочому місці, розлив миючих засобів (ЛЗР) на ділянці розбирання ДВЗ, порушення концентрації ЛЗР при приготуванні розчинів, нероботоздатність припливно-витяжної вентиляції;
- імовірність 0,03 прийняти для: наявність іскри, корозія внаслідок попадання води, відсутність контролю якості посудин для зберігання ЛЗР; підвищена вологість в приміщеннях;
- імовірність 0,04 прийняти для: для високої температури в термічній печі та утворення в повітрі горючого пилу у зваженому стані.

На основі зазначених вихідних даних представлено розрахунки:

1. При реалізації рівня 2:

«ПОМИЛКА ПЕРСОНАЛУ» імовірність виникнення пожежі  $p_1$  залежить від:

- імовірності роботи в цеху людей з низьким рівнем професійної кваліфікації  $p_{\text{квал}}$ , яка обумовлена порушенням техніки безпеки на робочому місці, що призводить до підвищення імовірності розливу миючих засобів на ділянці розбирання ДВЗ та становить 0,02 АБО недотримання вимог технологічних процесів, яка обумовлена підвищенням імовірності приготування розчинів ЛЗР з недотриманням належної концентрації вихідних складових та становить 0,02. Тоді

$$p_{\text{квал}} = 1 - (1 - 0,02)(1 - 0,02) = 0,04$$

- імовірності появи джерела температури  $p_{\text{тем}}$ , яка обумовлена палінням персоналу на робочому

місці та становить 0,02 або появою іскри внаслідок недодержання умов технологічних процесів.

Тоді  $P_{темн}$ :

$$P_{темн} = 1 - (1 - 0,02)(1 - 0,03) = 0,05,$$

отже

$$P_1 = P_{квал} * P_{темн} = 0,04 * 0,05 = 2 * 10^{-3}.$$

2. При реалізації рівня 2:

«КОРОЗИЯ/ЗНОС РЕЗЕРВУАРУ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ПРОПАН-БУТАНОВОЇ СУМІШІ» імовірність виникнення пожежі  $p_2$  залежить від:

- імовірності розгерметизації резервуару  $P_{розг}$  внаслідок порушення його цілісності, що призводить до витoku газу та становить 0,001.

- імовірності появи джерела температури, яка обумовлена ймовірністю появи іскри при технологічному процесі та становить 0,03 АБО імовірністю прояву високої температури в термічній печі, яка використовується для загартування деталей, та становить 0,04. Тоді

$$P_{темн} = 1 - (1 - 0,03)(1 - 0,04) = 0,07,$$

отже,

$$P_2 = P_{розг} * P_{темн} = 0,001 * 0,07 = 7 * 10^{-5}.$$

- імовірності появи джерела температури  $P_{темн}$  внаслідок наявності іскріння при технологічному процесі ремонту та відновлення деталей ДВЗ, яка становить 0,03;

- імовірності розтікання легкозаймистих речовин  $P_{розт}$  внаслідок порушення цілісності резервуару, імовірність корозії якого при попаданні в нього води становить 0,03, АБО внаслідок підвищення імовірності організаційних помилок на дільниці при відсутності контролю якості посудин для зберігання ЛЗР, що становить 0,03, тоді

$$P_{розт} = 1 - (1 - 0,03)(1 - 0,03) = 0,06,$$

отже,

$$P_3 = P_{темн} * P_{розт} = 0,03 * 0,06 = 1,8 * 10^{-3}.$$

4. При реалізації рівня 2:

«КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ» імовірність виникнення пожежі  $p_4$  залежить від:

- імовірності виникнення джерела температури при технологічному процесі електродугового напilenня  $P_{техн}$ , що обумовлено утворенням в повітрі горючого високотемпературного пилу у зваженому стані, яка становить 0,04;

- імовірності пробую ізоляції, яка залежить від зовнішніх чинників, до яких відноситься підвищена вологість в приміщенні (імовірність прояву даного чинника становить 0,03) або імовірність знаходження припливно-втяжної вентиляції в нероботоздатному стані, яка становить 0,02. Тоді

$$P_{проб} = 1 - (1 - 0,03)(1 - 0,02) = 0,05,$$

отже,

$$P_4 = P_{техн} * P_{проб} = 0,04 * 0,05 = 2 * 10^{-3}$$

Із урахуванням рівнів 1-4 обчислимо імовірність виникнення пожежі на дільниці ремонту та відновлення ДВЗ.

$$\begin{aligned} P_{пожежі} &= 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4) = \\ &= 1 - (1 - 0,002)(1 - 0,00007)(1 - 0,0018)(1 - 0,002) = \\ &= 5,9 * 10^{-3}. \end{aligned}$$

Таким чином, одержаний результат перевищує допустимий рівень, що висувається до технологічних процесів з якості безпеки на об'єктах техногенного призначення. Отже, необхідно зробити низку заходів щодо підвищення протипожежного стану технологічного процесу ремонту та відновлення ДВЗ. Особливу увагу слід надати рівням «помилка персоналу», «легкозаймисті речовини», «коротке замикання», для яких імовірність прояву в наведених розрахунках знаходиться на рівні вищому, ніж  $10^{-3}$ .

Профілактика та попередження пожеж і вибухів на спеціалізованій дільниці відновлення ДВЗ вимагає використання певних типів сигналізаторів, які дозволять захистити обладнання та устаткування від пожежі, вибуху та пошкодження.

Однією з найважливіших подібних систем вважається сигналізатор, призначений для автоматичного безперервного контролю до вибухонебезпечних концентрацій горючих і токсичних газів в повітрі, а також температури повітря, видачі світлової і звукової сигналізації, для видачі електричних сигналів на зовнішні пристрої і комутації зовнішніх електричних кіл при перевищенні встановлених значень об'ємних часток контрольованих газів або температури повітря. Режими роботи сигналізатора: «ЧЕРГУВАННЯ» - здійснюється безперервний контроль загазованості та температури середовища; «ТРИВОГА» - здійснюється включення аварійної (світлової, звукової) сигналізації та виконавчих пристроїв у разі перевищення до вибухонебезпечних концентрацій газів (граничних концентрацій, температури) у контрольованому середовищі; «ТЕСТ» - здійснюється перевірка працездатності сигналізатора, спрацювання пристроїв захисту, блокування і сигналізації [8]. Значення коефіцієнту пропорційності для компонентів, що визначаються: метан – 0,47; пропан (бутан) – 0,27; водень – 0,38; гексан (пари бензину, пари дизельного палива) – 0,26.

Датчики сигналізатора необхідно встановити на постах очищення деталей, відновлення методом електродугового напilenня, проведення зварювальних робіт, в місці, де встановлений термостат для загартовування деталей після ремонтних робіт.

На дільниці запропоновано замінити місцеву втяжну механічну вентиляцію на механічну припливно-втяжну. Примусові установки забезпечені автоматичним управлінням. Повітря, що видаляється з приміщень та містить горючий пил і вибухонебезпечні пилоповітряні суміші, необхідно очищати в мокрих пилоуловлювачах. Системи місцевих відсмоктувачів від технологічного устаткування мають бути окремі для речовин, які у разі змішування можуть спричинити спалах, горіння або вибух. Увімкнення

вентиляторів місцевих відсмоктувачів, конструктивно пов'язаних з технологічним устаткуванням, повинно блокуватися з пусковим пристроєм устаткування.

Для одночасного відключення усіх вентиляторів, конструктивно пов'язаних з устаткуванням або вбудованих у технологічні схеми, а також інших вентиляторів, які обслуговують вибухонебезпечні приміщення, передбачається пристрій, який розташовується зовні будівлі.

На досліджуваній спеціалізованій дільниці доцільно провести заміну металевих балонів для газів на композитні, які характеризуються більшою довговічністю при експлуатації. Тиск на розрив полімерно-композитного балону практично в два рази вище за аналогічний показник для виробів, виготовлених з металу.

До переваг композитних балонів можна також віднести відсутність корозійних процесів, утворення іржі, що є першочерговими причинами зниження експлуатації металевих балонів. Слід зазначити, що процес руйнування стінки композитної колби відбувається набагато повільніше, тому контроль технічного стану виконується раз в 10 років, тоді як металеві конструкції проходять планову перевірку кожні 5 років.

Полімерні ємності для зберігання газу виготовляються за кордоном, тож їх запірна арматура відповідає світовим стандартам. Сталева тара в нашій країні зазвичай комплектується стандартними вентилями без запобіжних пристроїв, що робить їх менш безпечними.

Таким чином, проведена оцінка технологічного процесу відновлення деталей ДВЗ виявила потенційні

небезпеки на дільниці, імовірність їх прояву, на основі чого були розроблені рекомендації щодо посилення безпеки даного технологічного процесу.

### Висновки

1. Результати попереднього аналізу небезпек стосовно експлуатації резервуара пропан-бутанової суміші та в процесі очищення деталей від нагару у резервуарі з легкозаймистою речовиною свідчать про наявність потенційних небезпек в технологічному процесі відновлення деталей, які можуть призвести до аварійних ситуацій «пожежа / вибух», що призведуть до III критичного стану прояву небезпек, що вимагає негайних заходів з порятунку персоналу та обладнання.

2. За результатами розрахунків імовірності прояву потенційної небезпеки типу «пожежа» на дільниці ремонту встановлені найбільш небезпечні потенційні джерела, які, згідно дереву відмов, знаходяться на рівнях «помилка персоналу», «легкозаймисті речовини», «коротке замикання», для яких імовірність прояву пожежі в наведених розрахунках знаходиться на рівні вищому, ніж  $10^{-3}$ .

3. Запропоновано низку заходів для підвищення рівня безпеки технологічного процесу на дільниці, до яких відносяться встановлення припливно-витяжної вентиляційної системи з метою підвищення якості очищення повітря; заміна металевого балону для пропан-бутанової суміші на балон з полімерно-композитного матеріалу; встановлення в приміщенні детекторів (сигналізаторів) шкідливих речовин на потенційно небезпечних постах технологічного процесу відновлення головок блоків циліндрів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коржавін Ю.А., Коробочка О.М. Ресурсозберігаючі технології технічного обслуговування та ремонту автомобілів. Навч. посібник. – 2009. – 182 с
2. Левківський О.П., Ковальов М.Ф. Напрямки поліпшення процесів ремонту автотранспортних засобів // ВІСНИК ЖДТУ, Серія: Технічні науки, 2014, № 2 (69), С. 164 – 167.
3. Про затвердження Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту / Наказ № 102 від 30.03.98 Міністерства Транспорту України.
4. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підручник. — К.: Знання-Прес, 2003. - 511 с..
5. Балабанов В.И. Безразборное восстановление трущихся соединений автомобиля. Методы и средства. — М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ». 2003.— 61 с.
6. Ремонт машин. Учебник для вузов [Текст] / Под. ред. Тельнова Н.Ф. – М.: Агропромиздат, 1992. – 560 с.
7. Сідашенко О.І. Ремонт машин та обладнання. – К.: Агроосвіта, 2014. – 665 с.
8. S. Anderson, M. Felici Emerging Technological Risk: Underpinning the Risk of Technology Innovation. – Springer Science & Business Media, 2012. - 186 p.

Received (Надійшла) 05.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2020

### Analysis of fire safety and development of preventive measures relating to the decrease in the specialized development of car parts

O. Mikosianchuk, N. Kichata, T. Savytska, D. Rigus

**Abstract.** In order to reduce the number of emergencies caused by crash or accidents in transport, timely repair of car parts and the safety of technological processes during their implementation are important factors. In this work, the technological process of repair of car parts is investigated and dangerous factors in production are identified. Using the methods of preliminary hazard analysis and the fault tree, the probability of occurrence of potential hazards at a specialized site for the recovery of internal combustion engines was determined and the consequences that they could lead to were predicted. Were suggested measures for installation of ventilation systems at a specialized section in order to improve the quality of air cleaning. Were provided suggestions and recommendations for the development of preventive measures to reduce the level of fire danger at the specialized section of the recovery of heads of blocks of cylinders of internal combustion engines.

**Keywords:** repair, potential hazards, technological process, preliminary hazard analysis, fault tree, fire protection.

О. В. Панова

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

**Анотація.** На основі аналізу даних про екранування електромагнітних полів наднизьких та ультрависоких частот будівельними та облицювальними матеріалами зроблено висновки, що найбільш доцільним з технічних та економічних міркувань є облицювання захисними матеріалами внутрішніх поверхонь будівель. Наведено коефіцієнти екранування розробленими металополімерними матеріалами електромагнітних полів різних частот. Для електромагнітних полів частотами 2,4-2,6 ГГц коефіцієнти екранування складають 2,44 (за товщини екрана 5 мм) та 3-52 (за товщини екрана 10 мм). Коефіцієнти відбиття складають 0,06-0,32. Зміна концентрації феромагнітної субстанції становить 5-20 % (за вагою). За таких умов зниження напруженості магнітного поля промислової частоти складають 1,2-15,0 (за товщини екрана 5 мм) та 2,3-38,0 (за товщини екрана 10 мм). Наведено порядок оцінювання ефективності екранування високочастотного екранованого поля тришаровою структурою, виходячи зі значення діелектричної проникності несучого матеріалу та мінімальної довжини електромагнітної хвилі діапазону екранованого поля. Для одночасного екранування магнітного поля промислової частоти провідний шар повинен бути феромагнітним. Для цього можна застосувати металополімер з великою концентрацією залізородного концентрату.

**Ключові слова:** електромагнітні поля; екранування; коефіцієнти екранування; облицювальний захисний будівельний матеріал.

### Вступ

Підвищення електромагнітного навантаження на довкілля, тобто збільшення кількості та потужності зовнішніх джерел полів та випромінювань впливає на електромагнітну обстановку усередині будівель і споруд.

Актуальною задачею є захист від впливу техногенних полів на людей у виробничих та побутових умовах. Найбільш сучасний метод захисту – екранування [1].

Відомо, що будівельні матеріали й конструкції частково екранують електромагнітні поля й випромінювання і для цього розробляються захисні матеріали, суміші або концентрати з керованими коефіцієнтами екранування у різних частотних діапазонах [2]. Але кількісні дані щодо коефіцієнтів екранування навіть традиційних і поширених будівельних матеріалів дуже різняться і потребують уточнення. У багатьох випадках потребує впровадження додатковий захист виробничих і побутових приміщень спеціальними екранувальними матеріалами. Враховуючи, що у цьому випадку необхідне облицювання великих площ, одним з головних критерій при розробленні захисних матеріалів є їх вартість та технологічність при застосуванні, а також стійкість за довгострокової експлуатації.

У промислових будівлях, що потребують екранування, окремих приміщень необхідна наявність даних про екранувальні властивості облицювальних матеріалів та розроблення засобів підвищення таких властивостей. Ці дані необхідні не тільки для захисту персоналу на виробництві чи підприємстві, а й технічного захисту інформації та забезпечення електромагнітної сумісності чутливого кошового електронного обладнання [3].

Тому усі ці заходи та ефективність засобів захисту повинні бути певним чином раціоналізовані.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ознайомлення з довідковими даними щодо екранування електромагнітних полів будівельними матеріалами та конструкціями дозволяє дійти висновку, що вони не однозначні та у багатьох випадках викликають сумніви. Майже в усіх довідниках наведено, що цегляна стіна завтовшки 0,7 метрів знижує рівні електромагнітних випромінювань сантиметрового діапазону на 16,0-21,0 дБ. Шлакобетонні стіни – на 14,5-20,5 дБ. Монолітнобетонні будівлі – 6,0-16,0 дБ та 10,0-30,0 дБ у залежності від кроку арматури. За таких коефіцієнтів екранування (принаймні 10-100) сигнали базових станцій мобільного зв'язку, які працюють на довжинах хвиль сантиметрового діапазону (17,0-11,5 см) майже повністю повинні зникати (інтенсивність випромінювань станцій майже ніколи не перевищує 0,10-0,08 мкВт/см<sup>2</sup>). Але цей факт суперечить повсякденній практиці: практично в усіх залізобетонних будівлях мобільний зв'язок функціонує стабільно.

Відсутність надійних систематизованих даних щодо захисних властивостей будівельних та облицювальних матеріалів певним чином обумовлене відсутністю таких вимог у чинних будівельних нормах [4]. Тому дослідження й практичні розробки у цьому напрямку поодинокі і не носять системний характер. Практично усі публікації щодо захисних властивостей будматеріалів стосуються електромагнітних випромінювань ультрависоких частот [5].

У роботі розглянуто ефективність екранування різними матеріалами високочастотних випромінювань. Але розглянуті матеріали дуже складні та мало придатні для застосування ззовні будівель і мають велику вартість.

Дослідження [6] присвячене визначенню змінам електромагнітної обстановки через відбиття електромагнітних хвиль базових станцій мобільного зв'язку від вертикальних та горизонтальних метале-

вих облицювальних покриттів. Отримані дані свідчать, що розташування кількох випромінювачів у зоні прямої видимості за наявності відвальних поверхонь значно погіршує електромагнітну обстановку.

У роботі [7] приведено результати випробувань захисних властивостей штукатурки з наповнювачами з феритного порошку та вуглецевих волокон у діапазоні мобільного зв'язку – 850-1880 МГц. Ці матеріали показали малі коефіцієнти відбиття, що найбільш важливо для такого частотного діапазону.

Аналогічне дослідження стосується вуглецевих фарб на основі графітізованої сажі [8]. Недоліком згаданих робіт є орієнтація виключно на високочастотні діапазони.

Щодо захисту від впливу електромагнітних полів конструкційними матеріалами, то найбільш ґрунтовними та достовірними є роботи з дослідження ефективності покрівельних матеріалів [9] та екрануючих властивостей будівельних матеріалів існуючих будівель [10]. У роботі [9] розглянуто захист від електромагнітних полів промислової частоти шифером, металочерепицею, листовою сталлю тощо. Отримані результати свідчать про їх достатню ефективність.

Наведені дані не стосуються магнітних полів, але у дослідженні [10] наведено, що будівлі із залізобетону мають коефіцієнти екранування магнітних полів промислової частоти 1,04–1,07, що явно недостатньо у сучасних умовах.

Наведений аналіз свідчить, що потребує розроблення й дослідження захисних властивостей матеріалів для захисту від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Створення будівельних матеріалів з потрібними властивостями проблематичне через можливість зниження міцнісних характеристик за наявності в них екрануючих домішок.

Щодо облицювальних матеріалів, то їх механічні властивості менш критичні.

Запропоновані методики щодо визначення захисних властивостей електромагнітних екранів [11] та дослідження захисних властивостей різноманітних новітніх матеріалів [12] не правилом для всіх наступних експериментів. До того ж існує можливість регулювати захист властивості облицювальних і оздоблювальних матеріалів, що неможливо для несучих конструкцій виробів.

### Виклад основного матеріалу

Проведений аналіз відомостей щодо фактичних екрануючих властивостей будівельних матеріалів та розробок свідчить, що традиційні будівельні матеріали мають малі екрануючі властивості як у наднизькій області електромагнітного спектра та й ультрависокочастотній.

У таких умовах **головною метою** є створення перспективних матеріалів для облицювання поверхонь будівель та приміщень. Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

- отримання матеріалів для облицювання зовнішніх та внутрішніх поверхонь великих площ, прийнятної вартості;

- максимально можлива уніфікація матеріалів та конструкцій, придатних для екранування;

З економічної точки зору доцільно здійснювати облицювання екрануючими матеріалами внутрішньої поверхні. (Це знімає проблеми деградації матеріалів під впливом атмосферних чинників, герметичності нанесення на зовнішні поверхні тощо);

Для облицювання внутрішніх поверхонь стін ефективним є застосування розробленого металополімерного матеріалу, який складався з поширеного та дешевого латексу та відходів збагачення залізної руди [13]. Екранувальні властивості цього матеріалу щодо електромагнітних випромінювань ультрависокої частоти наведено у табл. 1.

**Таблиця 1 – Коефіцієнти екранування та відбиття електромагнітних хвиль ультрависокої частоти в залежності від вмісту екрануючої субстанції у полімерній матриці товщинами 5 мм та 10 мм**

$\rho$ , %	$K_e$		$K_e$
	5 мм	10 мм	
5	2	3	0,06
10	10	19	0,10
15	33	38	0,28
20	44	52	0,32

У табл. 1:  $\rho$  – вміст металевої субстанції (за вагою);  $K_e$  – загальний коефіцієнт екранування;  $K_e$  – коефіцієнт відбиття, який не залежить від товщини матеріалу.

Коефіцієнт екранування магнітного поля промислової частоти наведено у табл. 2.

**Таблиця 2 – Залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти від вмісту екрануючої субстанції та товщини матеріалу**

$\rho$ , %	$K_e$	
	5 мм	10 мм
5	1,2	2,3
10	4,6	10,8
15	11,0	24,0
20	15,0	38,0

Наведені у табл. 1 та 2 дані свідчать, що коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти достатні навіть в умовах впливу радіотехнічних об'єктів великої потужності. При цьому коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль набагато нижчі, ніж у будь-яких провідних матеріалів. Але щодо електромагнітних полів засобів мобільного зв'язку – вони можуть бути надлишковими, тобто повністю блокувати мобільний зв'язок (враховуючи прийнятні коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти навіть у виробничих умовах експлуатації потужного електротехнічного обладнання).

Тому, під час планування запровадження екранування приміщень необхідно узгодити ступень екранування низькочастотного магнітного поля з потребами функціонування мобільного зв'язку.

За відсутності необхідності отримання великих коефіцієнтів екранування в умовах облицювання поверхонь матеріалами типу гіпсокартону можливе запровадження екранування конструкціями, подібними до градієнтних екранів.

Відомо, що гіпсокартон кріпиться до стін спеціальними системами. Визначивши переважну частоту зовнішнього випромінювання, необхідно зробити зазор завтовшки  $\lambda/4$ , де  $\lambda$  – довжина падаючої хвилі. Згасання електромагнітної хвилі відбувається за відомим механізмом при взаємодії падаючої та відбитої хвилі. Єдиною умовою є наявність на тильному боці гіпсокартонного листа металеві поверхні. У даному випадку тип металу не має значення. Головна умова – це провідність матеріалу.

На нашу думку, найбільш зручною поверхнею є поверхня провідної фарби, але на сьогоднішній день фарб, прийнятних за ціною для широкого застосування не виробляється. Зниження коефіцієнтів відбиття випромінювання обмежено значенням відносної діелектричної проникності підкладки (для гіпсокартону –  $3,0 \div 4,0$ ). У широкому діапазоні довжин хвиль коефіцієнт відбиття на нижче

$$K_b = 10 \lg \left( \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right)^2, \text{ дБ,}$$

який за цих умов складає –  $8,0 \div 9,0$  дБ.

У облицювальній тришаровій структурі, де внутрішній шар – зазор між діелектриком і металевим покриттям завтовшки  $0,5$  максимальної довжини хвилі діапазону, коефіцієнт відбиття знизиться до  $14,0 \div 17,0$  дБ у широкому діапазоні довжин хвиль. При цьому повинна виконуватись умова, що товщина зовнішньої оболонки  $d$  та мінімальна довжина хвиль діапазону  $\lambda_{\min}$  відповідає співвідношенню:

$$\frac{d\sqrt{\varepsilon}}{\lambda_{\min}} < 0,3.$$

За подальшого зменшення довжини хвилі коефіцієнт відбиття буде зростати й досягне максимального значення –  $3,0 \div 4,0$  дБ за умови:

$$\frac{d\sqrt{\varepsilon}}{\lambda_{\min}} = 0,25.$$

Для одночасного екранування магнітного поля промислової частоти провідний шар повинен бути феромагнітним.

Враховуючи велику площу покриття, у якості такого шару можливо використовувати металополімер, подібний до описаного вище, але з більшим вмістом феромагнетика. У якості останнього доцільно використовувати концентрат залізної руди, який має відносну магнітну проникність  $110-140$ .

Попередні вимірювання показали, що коефіцієнт екранування такого матеріалу, за вмісту феромагнетика  $20\%$  і товщини  $1,0$  мм, повинен складати  $2,0-4,0$ , що можна вважати задовільним. Недоліком цього матеріалу є низька технологічність при облицюванні поверхонь складної конфігурації та великий відсоток відходів.

Головною проблемою для проектування екрануючих конструкцій з використанням композитів є те, що дані про магнітні та електрофізичні властивості металополімерів не є табличними. Як правило, у довідковій літературі наведено відомості про властивості чистих металів або сплавів та полімерів широкого застосування. В принципі, маючи дані щодо показників металеві та металовмісної компоненти та полімеру (матриці) можливо розрахувати діелектричну проникність та провідність композиту. Співвідношення електродинаміки суцільних середовищ дозволяють розрахувати коефіцієнт заломлення матеріалу, а на його основі й діелектричної проникності – відносну магнітну проникність. Але в цьому випадку необхідно врахувати дійсну та уявну складові діелектричної проникності, що не завжди можливо та зручно. У результаті прогнозовані параметри матеріалу дуже приблизно і мало придатні для проектування матеріалів потрібних захисних властивостей. Крім того, за різної концентрації провідної субстанції параметри дуже відрізняються, а саме дрібно дисперсна субстанція, навіть за сприятливих умов розподілена у тілі полімеру не зовсім рівномірно. Для товщини  $5-10$  мм це не критично, відносно коефіцієнта екранування, але розрахунковий апарат це не враховує. Наприклад, відмінності у значеннях відносної діелектричної проникності за вмісту залізородного пилу у полімерній матриці  $10-15\%$  складають  $5-85$  і похибки досягають  $20-25\%$ . Це ж стосується результатів провідності. Навіть дані щодо ефективної провідності серійної магнітної рідини з фіксованим вмістом феромагнітних наночастинок коливаються у межах  $70-100$ , що незадовільно для розрахунків.

Найбільш раціональним на наш погляд, є отримання необхідних даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей композиційних матеріалів з експериментів. Для ефективної магнітної проникності це можливо реалізувати за рахунок вимірювання коефіцієнта екранування магнітного поля. Існуючі співвідношення для коефіцієнтів екранування сферичними та циліндричними оболонками. Знаючи товщину стінки, радіуси оболонок та коефіцієнти екранування легко розраховуються ефективні магнітні проникності для композитів різного складу. Діелектричні проникності та питомі провідності визначаються прямими вимірюваннями. Це надає змогу отримати достатню кількість довідкових даних, але це потребує великих обсягів експериментальних робіт.

Тому, перспективним напрямком є розроблення металовмісної фарби з:

- прийнятними реологічними властивостями;
- доброю адгезією з найбільш поширеними металевими основами – поверхні, яка потребує покриття потрібною кількістю екрануючої фарби.

## Висновки

1. На основі аналізу засобів екранування електромагнітних полів та випромінювань будівельними та облицювальними матеріалами показано, що найбільш ефективним засобом зниження впливу на



працюючих зовнішніх полів, доцільне облицювання поверхонь будівель захисними матеріалами.

2. Розроблені металополімерні екрануючі матеріали гарантовано знижують електромагнітні поля ультрависокої частоти (2,4–2,6 ГГц) у 2,0–44,0 рази (за вмісту феромагнетиту 5–20 %). Магнітне поле промислової частоти одночасно знижується у 1,2–15,0 разів.

3. Наведено порядок однозначного визначення захисних властивостей конструкцій, виходячи з

діелектричної проникності матеріалу основи та мінімальної довжини хвилі діапазону електромагнітних хвиль, що екрануються.

4. Показано, що для одночасного екранування височастотних випромінювань та магнітного поля промислової частоти доцільно у якості провідного шару застосовувати металополімери з великим вмістом феромагнітної субстанції. Перспективним є розроблення екрануючої фарби, яка може бути нанесена на основу у потрібній кількості.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Панова О. В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. Панова Олена Василівна. Київ, 2014. 151 с.
2. Панова О.В., Бірук Я.І. Концептуальні підходи до керування електромагнітною обстановкою у виробничих умовах / Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення". Розділ Технічні науки. Секція «Безпека життєдіяльності». Випуск 47. С. 92-96. <https://drive.google.com/file/d/1Bdbmn2miwiqf5gsv3a933sEgCwHJJfoW/view>
3. Панова О.В. Загальні критерії застосування електромагнітних екранів для забезпечення електромагнітної безпеки та сумісності технічного обладнання. Наука та інновації. «Вісті Донецького гірничого інституту», Випуск 2, 2018. [www.science.donntu.edu.ua](http://www.science.donntu.edu.ua)
4. Проектування висотних житлових і громадських будинків ДБН В.2.2. – 24: 2009 – [Чинний від 01-10-09]. Київ. Мінрегіонбуд, 2009. 103 с. (Державні будівельні норми України).
5. Антипов С.А., Латыпов А.Ф., Пастернак Ю.Г. Обзор радиопоглощающих структур на основе электромагнитных искусственных поверхностей. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. № 5-1. Т. 10. С. 9 – 15.
6. Мордачев В.И., Юрцев О.А., Литвинко П.А. Влияние декоративных металлических покрытий зданий на электромагнитную обстановку и электромагнитную совместимость радиосистем. Вестник белорусского государственного технического университета. 2009. № 6. С. 42 – 47.
7. Беляев А.А., Беспалов А.А., Лепешкина В.В. Радиопоглощающие материалы на основе отделочных строительных материалов для защиты от СВЧ излучения базовых станций сотовых связи. Труды ВИАМ. 2015. № 6. С. 80-88.
8. Сенік І.В., Барсуков В.З., Крюкова В.А. Спеціальні покриття для захисту персоналу та спорядження від електромагнітного випромінювання. Легка промисловість. 2016. № 1. С. 18-24.
9. Графкіна М.В., Свиридова Е.Ю. Исследование эффективности электромагнитного экранирования кровельных строительных материалов. Вісник ГКСУ. 2011. № 1. С. 413-416.
10. Пелевин Д.Е. Экранирование магнитного поля промышленной частоты стенами жилых домов. Електротехніка і електромеханіка. 2015. № 4. С. 53-55.
11. Панова О.В. Методика визначення захисних властивостей електромагнітних екранів. Техніка Будівництва: Науково-технічний журнал Київ. 2010. Випуск 25. С. 74-76.
12. Глива В.А., Панова О.В. Дослідження захисних властивостей матеріалів для екранування електромагнітних полів. III Міжнар. наук.-техн. конф. 7 квітня 2011 р. «Енергетика, Екологія, Людина». Київ. НТУУ «КПІ»
13. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

#### Research of protective properties of metal electromagnetic screens and determining the conditions for their maximum efficiency

O. Panova

**Abstract.** Based on the analysis of data on the screening of electromagnetic fields of ultra-low and ultra-high frequencies of construction and cladding materials, it is concluded that the most appropriate for technical and economic reasons is lining the internal surfaces of buildings with protective materials. Shielding coefficients of the developed metal-polymer materials of electromagnetic fields of various frequencies are given below. For electromagnetic fields with frequencies of 2.4-2.6 GHz, the screening coefficients are 2.44 (with a screen thickness of 5 mm) and 3-52 (with a screen thickness of 10 mm). Reflection coefficients are 0.06-0.32. The change in the concentration of ferromagnetic substance is 5-20% (by weight). Under such conditions, a decrease in the magnetic field of industrial frequency is 1.2-15.0 (with a screen thickness of 5 mm) and 2.3-38.0 (with a screen thickness of 10 mm). Proposed a procedure to be used for evaluating the effectiveness of shielding a high-frequency screened field with a three-layer structure, based on the value of the dielectric constant of the carrier material and the minimum electromagnetic wavelength range of the screened field. For simultaneous shielding of industrial frequency magnetic fields, the leading layer must be ferromagnetic. Metal polymers with a high concentration of iron ore concentrate can be used to achieve this.

**Keywords:** electromagnetic fields; shielding; screening factors; cladding protective building material.

Б. Д. Халмурадов, М. М. Багрій

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## ЗАСАДИ РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ВІД ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

**Анотація.** Предметом дослідження є визначення загальних конструктивно-технологічних рішень виготовлення та випробування одягу для захисту працюючих від впливу електромагнітних полів. Обґрунтовано використання льняної тканини для виготовлення спецодягу, а саме пористість структури волокна, що дає можливість насичення її екрануючими металевими частинками (магнітною рідиною з вмістом феромагнітних наночастинок). Розглянуто два способи підвищення функціональності спеціального захисного одягу шляхом підвищення захисних властивостей одного шару металополімерного матеріалу. Перший – використання у якості екрануючої субстанції не залізорудного пилу, а залізорудного концентрату, який є кінцевим продуктом збагачення залізної руди. Другий спосіб полягає у збільшенні товщини металополімеру за рахунок зниження тиску під час його нанесення на текстильну основу (прокачування крізь вальці), що дозволить збільшити товщину екрануючих вставок до 1,0 – 1,5 мм та суттєво не вплине на ергономічні характеристики одягу. Отримані результати показують доцільність для підвищення ефективності захисту працюючих, дозволяють розробляти комбіновані засоби захисту з використанням як металополімерних, так і металотекстильних матеріалів.

**Ключові слова:** захисний матеріал, коефіцієнт екранування, феромагнітні наночастинок, залізорудний пил, залізорудний концентрат.

### Вступ

Міжнародний норматив [1] та національний норматив України [2] вимагають забезпечення персоналу, що працює в умовах впливу електричних, магнітних та електромагнітних полів наднормативних рівнів. Існуючі захисні костюми із вплетеними дротами не відповідають сучасним вимогам через необхідність заземлення одягу, низьку ергономічність через жорсткість матеріалу та деградацію захисних властивостей внаслідок розриву дротів у процесі експлуатації. Сучасні композиційні матеріали частково позбавлені цих вад, але жоден з них не відповідає актуальним вимогам у повному обсязі. Значною мірою це обумовлене неузгодженістю розроблення й дослідження захисних властивостей композитів та розроблення захисного одягу потрібних функціональних властивостей, що є актуальною науково-прикладною задачею.

**Стан питання.** Розробленню та дослідженню властивостей захисних матеріалів та виготовлення з них захисного одягу для персоналу, що працює в умовах впливу небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища приділяється багато уваги. Найбільша кількість досліджень й розробок присвячена захисту пожежних [3, 4].

Не дивлячись на відмінність факторів впливу, ці роботи важливі з точки зору термодинамічних характеристик костюму, що є обов'язковим для захисного одягу будь-якого призначення. У загальному випадку захист від впливу конкретного шкідливого фактора та інші параметри одягу можна поєднати [5]. Цей напрям досліджень розвинутий у роботі [6]. З'ємність конструктивних елементів захисту дозволяє змінювати рівень захисту від впливу електромагнітних полів у залежності від конкретних виробничих умов, але для деяких випадків, за відносно невеликих напруженостей по-

лів, доцільно розробити захисний костюм з одного прийняттого матеріалу. Такий матеріал може бути отриманий просоченням екрануючої субстанцією обраного текстильного матеріалу [7].

Дослідження [4] свідчать, що використання нанозаліза у вигляді магнітної рідини забезпечує великі коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти та електромагнітного поля ультрависокої частоти. Але отримані показники надлишкові, тобто для більшості виробничих умов такі коефіцієнти екранування не потрібні, а вартість магнітної рідини дуже висока, зокрема у пропонуваніх кількостях.

Розробка [5] свідчить, що достатні, а за великих концентрацій металевої та металовмісної субстанції, великі коефіцієнти екранування можна отримати при використанні залізорудного пилу, а відповідно у якості носія (матриці) використовується пінолатекс, непридатний для виготовлення одягу. Отримані результати, зокрема універсальність щодо частоти екранованого поля та низька вартість, обумовлює доцільність досліджень щодо використання залізорудного пилу для виготовлення захисного покриття на основі текстильного матеріалу.

Актуальною є задача вибору найбільш раціонального матеріалу для виготовлення захисного одягу та конструкції для захисту від дії різних електромагнітних впливів.

**Метою роботи** є визначення загальних конструктивно-технологічних засад виготовлення та випробування одягу для захисту працюючих від впливу електромагнітних полів з урахуванням параметрів вихідних матеріалів.

### Результати досліджень

Досвід розроблення та дослідження текстильних та полімерних матеріалів для виготовлення

засобів індивідуального захисту свідчать, що обидва класи матеріалів придатні для цього.

Відмінності полягають тільки у конструкціях захисного одягу.

З текстильного матеріалу доцільно виготовляти одяг, який відповідає певним вимогам ергономічних характеристик. Це стосується персоналу, який у процесі виконання службових обов'язків багато пересувається:

робітники з обслуговування повітряних ліній електропередачі,

радіотехнічні об'єкти бездротового зв'язку та аеродромного обладнання.

Полімерні захисні матеріали застосовуються у якості вставок у захисний одяг [6].

Такі конструкції костюмів досить ефективні, але мають нижчі ергономічні показники через жорсткість конструкції. Цей одяг доцільно використовувати для виконання робіт, які не вимагають великої рухливості та пересування – електрозварювання, обслуговування трансформаторних підстанцій та відкритих розподільчих пристроїв енергетичних мереж.

Основною задачею проектування є способи закріплення залізорудного пилу у волокнах текстильного матеріалу. Звичайне просочення тканини водним розчином залізорудного пилу не дає бажаного результату через недостатнє зчеплення частинки з волокнами.

Необхідність доброго зчеплення обумовлюється обов'язковим витримуванням одягу багаторазового прання без втрати захисних властивостей. Запропоновано та проаналізовано два способи закріплення частинки залізорудного пилу у волокнах текстильного матеріалу

Для виготовлення захисних костюмів з текстильного матеріалу доцільно використовувати льняну тканину, волокна якої насичені екрануючими металевими частинками. Для проведення досліджень було обрано у якості основного матеріалу тканину (артикул – 3581, волокнистий склад: ЛН–75 %, ПЕФ–25 %), яка використовується для виробництва спеціального одягу. Її перевагою є висока міцність та низька горючість порівняно з синтетичними матеріалами.

Наприклад, у роботі [8] показано, що оброблення льняної тканини, просоченої магнітною рідиною з вмістом феромагнітних наночастинок у неоднорідному постійному магнітному полі напруженістю 450 А/м підвищує коефіцієнт екранування електричного поля промислової частоти з 1,4 до 2,9. Коефіцієнт екранування магнітного поля промислової частоти підвищується з 1,9 до 2,3. При цьому застосовувався лише один шар тканини. За двох шарів коефіцієнт екранування підвищується до 5,2, а при трьохшаровому захисті до 8,9. Відомо, що рівні електромагнітних полів промислової частоти у виробничих умовах майже ніколи не перевищують гранично допустимі у 2-3 рази, такі захисні якості матеріалу є цілком задовільними.

При проектуванні захисного одягу крім ергономічних показників необхідно враховувати міцні-

сні та термодинамічні параметри виробів. Щодо захисних властивостей, та згідно з національними нормативами, такий одяг повинен витримувати принаймні п'ять циклів прання або відповідну кількість хімічних чищень. Збереження захисних властивостей регламентується спеціальними випробуваннями за стандартною методикою.

Ще однією принциповою відмінністю захисних конструкцій щодо екранування електромагнітних полів промислової частоти є необхідність уникати у суцільних конструкціях різких звужень та заломів. У [8] показано, що за перебування у суцільному костюмі у вертикально спрямованому магнітному полі у шийному відділі відбувається не зниження, а підвищення індукції магнітного поля. Це обумовлене зменшенням площі протікання магнітного потоку. Тому при розробленні костюму захисний матеріал повинен переходити з верхньої частини костюму, що вкриває голову людини, до частини костюму, що вкриває плечовий пояс людини, без конструктивних елементів, що забезпечують прилягання одягу та заломів (трапецивидно).

Щодо електромагнітних випромінювань ультрависоких частот, які забезпечують бездротовий зв'язок (1,8 – 2,6 ГГц), та гарантовані коефіцієнти екранування 1-2-шаровими металотекстильними матеріалами складають 2 – 3. Враховуючи, що гранично допустимий рівень щільності потоку енергії для цих частот складає 10 мкВт/см<sup>2</sup>, наведені коефіцієнти екранування є достатніми.

Для виготовлення захисного одягу з екрануючими металополімерними вставками у технологічні кишені [6] не бажано застосовувати кілька шарів захисту через певну жорсткість матеріалу. Але захисні властивості одного шару металополімеру недостатні [7], як для магнітного поля промислової частоти (2,2 – 2,6), так і для випромінювання ультрависоких частот (2,1 – 2,4). Тому для підвищення функціональності такого одягу необхідно підвищити захисні властивості одного шару металополімерного матеріалу. Це можливе у два способи. Перший – використання у якості екрануючої субстанції не залізорудного пилу, який насичується на фільтрувальних завесах у аспіраційних системах при подрібненні залізної руди, а залізорудного концентрату, який є кінцевим продуктом збагачення залізної руди.

Другий спосіб полягає у збільшенні товщини металополімеру. Раніше розроблений матеріал мав товщини 0,3 – 0,5 мм. Тому зниження тиску під час нанесення металополімеру на текстильну основу (прокачування крізь вальці) дозволить збільшити товщину екрануючих вставок до 1,0 – 1,5 мм, суттєво не вплине на ергономічні характеристики одягу (рис. 1, 2). В той же час екрануючі властивості матеріалу зростають лінійно пропорційно з товщиною матеріалу.

У результаті захисні показники матеріалу складають 3,5 – 4,5, що є достатнім.

Результати випробувань захисних властивостей матеріалу наведено у табл. 1 та 2.

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта екранування електромагнітного поля  $K_e$  частотою 1,8 ГГц від кількості шарів захисного матеріалу  $n$ \*

$n$	1	2	3	4
$K_e$	2,8	5,6	9,6	17,0

\* Коефіцієнтом екранування вважається відношення щільності потоку енергії перед екраном до цього показника у захищеній зоні. Вихідна щільність потоку енергії 190-210 мкВт/см<sup>2</sup>

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта екранування електромагнітного поля  $K_e$  частотою 50 Гц від кількості шарів захисного матеріалу  $n$ \*

$n$	1	2	3	4
$K_e$	2,9	8,0	16,2	23,0

\* Коефіцієнтом екранування вважається відношення індукції магнітного поля перед екраном до цього показника у захищеній зоні. Вихідна індукція магнітного поля 230-240 мкТл

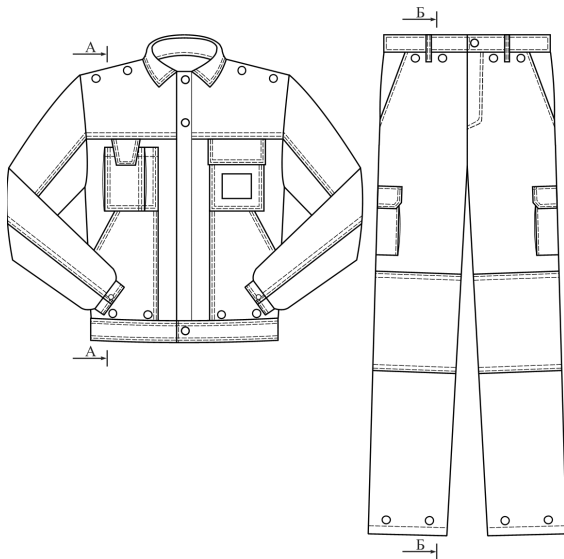


Рис. 1. Схематичне зображення зовнішнього виду костюму для захисту від впливу ЕМП широкого частотного діапазону

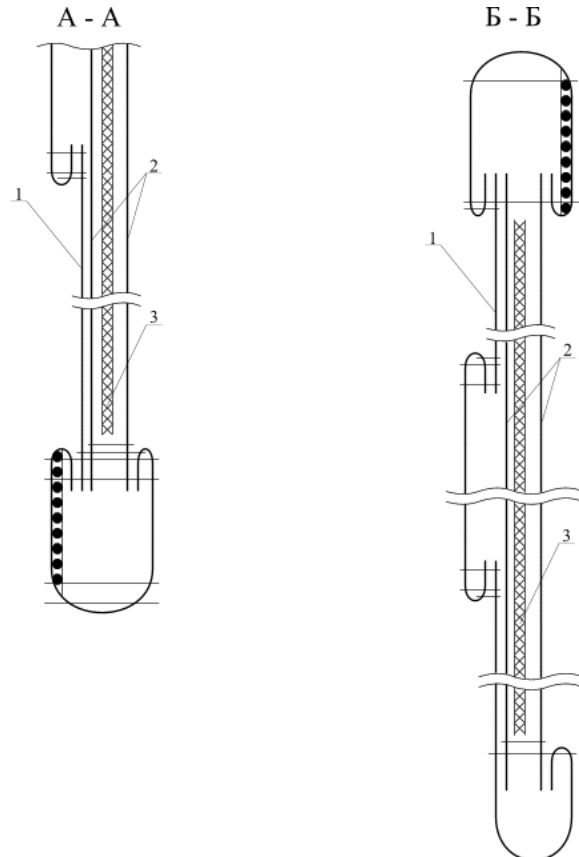


Рис. 2. Переріз пілочок куртки та переріз штанів.  
1 – тканина основи, 2 – тканина підкладки, 3 – з'ємний захисний елемент

Як видно з наведених даних, коефіцієнти екранування в обох випадках дещо вищі порівняно з даними, наведеними у [9].

Експериментально визначаються коефіцієнти екранування матеріалу у залежності від його товщини та вмісту екрануючої субстанції.

Для цього можна використати відоме співвідношення для довгого циліндричного екрана:

$$K_e \approx \frac{\mu_{ef} \cdot (b^2 - a^2)}{4b^2}, \quad (1)$$

де  $K_e$  – коефіцієнт екранування;  
 $\mu_{ef}$  – ефективна магнітна проникність матеріалу;

$b, a$  – зовнішній та внутрішній радіус екрана ( $b - a$  – товщина стінки).

На основі експериментальних даних щодо коефіцієнта екранування визначається залежність ефективної магнітної проникності від геометричних та фізико-хімічних параметрів екрана.

Цю залежність використовують у подальшому для отримання екрануючого матеріалу з коефіцієнтом екранування, відповідними умовами експлуатації захисного одягу.

Захисний одяг з металополімерними вставками відповідає чинним вимогам до таких виробів. Методики випробувань захисних властивостей одягу для захисту від впливу електричних, магнітних та електромагнітних полів передбачає контрольні вимірювання у зонах голови, грудної клітки та нижньої частини тулуба. Але, як показано вище, захисний матеріал може сприяти підвищенню індукції магнітного поля у шийному відділі. Це ж можливе в інших місцях з великою кривизною захисного матеріалу. Тому доцільним є для підвищення ефективності захисту працюючих розробляти комбіновані засоби захисту з використанням як металополімерних, так і метало- текстильних матеріалів.

### Висновки

1. Проектування спеціального одягу для захисту працюючих від впливу електромагнітних полів слід здійснювати у двох напрямках з урахуванням інтенсивності перебування працівників. Для персоналу з експлуатації повітряних ліній електропередачі та обслуговування радіотехнічних об'єктів доцільно виготовляти засоби індивідуального захисту з металотекстильного матеріалу. Для електроразв'язувальників та персоналу відкритих розподільчих пристроїв – з металополімерного матеріалу.

2. Для підвищення функціональності матеріалів для екранувального одягу доцільно збільшення коефіцієнтів екранування як низькочастотних, так й високочастотних полів. Це досягається магнітною обробкою текстильного матеріалу, просоченого магнітною рідиною. Для підвищення захисних властивостей металополімерного матеріалу має

сене заміни у якості екрануючого наповнювача залізородного пилу на залізородний концентрат та збільшити товщину матеріалу з 0,3 – 0,5 мм до 1,0 – 1,5 мм.

3. Підвищення індукції магнітного поля у підодяговому просторі у місцях звуження пакету одягу (шийний відділ) вимагає конструктивних рішень, за впровадження яких, елементи одягу не будуть мати заломів та звужень, де ущільнюється магнітний потік.

Доцільним є розроблення й випробовування захисного костюму комбінованого типу з використанням металотекстильного та металополімерного матеріалів.

4. Отриманий текстильний матеріал з заданими екрануючими властивостями має коефіцієнт екранування ( $K_e$ ) для частоти мобільного зв'язку 1,8 ГГц – 2,8-17,0 (зі збільшенням кількості шарів матеріалу зростає  $K_e$ ), для частоти 50 Гц – 2,9-23,0.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:EN>.
2. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів: ДСанПіН 3.3.6.096–2002. Офіційний вісник України від 07.09.2009. 2009. № 66.
3. Болибрух Б., Хмель М. Разработка и верификация расчетной модели теплового состояния теплозащитной одежды пожарного при различных видах испытаний. *Безопасность и Техника Пожарника*. 2015. № 2. С. 53-63.
4. Костенко Т.В. Охлаждения теплозащитного костюму рятувальника з допомогою пінного пристрою. *Геотехнічна механіка*. № 37. С 42-48.
5. Третьякова Л.Д., Остапенко Н.В., Колосніченко М.В., Луцкер Т.В. Зонально-модульна модель для розроблення комплектів захисного одягу. Вісник Хмельницького національного університету. 2015. № 2. С. 69-72.
6. Багрій М.М. Розроблення та дослідження екрануючих властивостей спецодягу для захисту від електромагнітних впливів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56) С. 118-121.
7. Левченко Л.О., Багрій М.М., Караєва Н.В. Дослідження екранування електромагнітного поля текстильним матеріалом з вмістом феромагнітних наночастинок. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту*. 2019. № 2 (45) С. 103-109.
8. Glyva V., Varabash O., Kasatkina N., Katsman M., Levchenko L., Tykhenko O., Nikolaiev K., Panova O., Khalmuradov B., Khodakovskiy O. *Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2020. № 1/10 (103). P. 26-31
9. Тихенко О.М., Багрій М.М., Левченко Л.О., Ходаковський О.В., Резнік Д.В. Розроблення та дослідження захисних властивостей металотекстильних електромагнітних екранів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2019. № 3. С. 47-51.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Fundamentals of designing materials and structures for the manufacture of personal protective equipment against the influence of electric fields

B. Khalmuradov, M. Bahrii

**Abstract.** The subject of the study is the determination of the general structural and technological solutions for the manufacture and the testing of clothing to protect employees from the influence of electromagnetic fields. It is substantiated that the use of linen fabric for the manufacture of workwear, namely the porosity of the structure of the fiber, which makes it possible to saturate it with shielding metal particles (a magnetic fluid containing ferromagnetic nanoparticles). Were considered two ways of enhancing the functionality of special protective clothing by enhancing the protective properties of one layer of metallic polymer material. The first is the use of iron ore concentrate, which is the final product of iron ore enrichment, as a shielding substance. The second method is to increase the thickness of the metal polymer by reducing the pressure during its application to the textile base (pumping through rollers), which will increase the thickness of the shield inserts to 1.0 - 1.5 mm and will not significantly affect the ergonomic characteristics of clothing. The results obtained show the feasibility of increasing the efficiency of worker protection, allowing the development of combined means of protection using both metal-polymer and metal-textile materials.

**Keywords:** protective material, shielding factor, ferromagnetic nanoparticles, iron ore, iron ore concentrate.

С. В. Шпак<sup>1</sup>, С. Г. Кислиця<sup>2</sup>, Г. М. Кожушко<sup>2</sup>, Т. В. Сахно<sup>3</sup>, С. Багиров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Державне підприємство «Полтавський регіональний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації», Полтава, Україна

<sup>2</sup> Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

<sup>3</sup> Вищий навчальний заклад Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі», Полтава, Україна

<sup>4</sup> Азербайджанський технічний університет, Баку, Азербайджан

## МЕРЕХТІННЯ ОСВІТЛЕНOSTІ ТА СТРОБОСКОПІЧНИЙ ЕФЕКТ, ЩО УТВОРЮЮТЬ СВІТЛОДІОДНІ ЛАМПИ ТА СВІТИЛЬНИКИ

**Анотація.** В роботі аналізуються результати останніх досліджень впливу мерехтіння світла на виконання зорових робіт, самопочуття та здоров'я людей, методи вимірювання параметрів мерехтіння та видимості стробоскопічного ефекту, а також безпечні рівні модуляції світла в різних частотних діапазонах, що встановлюються міжнародними стандартами. Досліджувались параметри мерехтіння світла, що створюють світлодіодні лампи та світильники, які поставляються на ринок України, вплив конструктивних особливостей цих виробів на рівень мерехтіння та особливості вимірювання модуляції світла з врахуванням просторової неоднорідності випромінювання світлодіодів. Вимірювання глибини модуляції, індексу мерехтіння та показника видимості стробоскопічного ефекту проводили у відповідності з рекомендаціями стандартів IEEE 1789:2015 та IEC/TR 63518:2018 з використанням спектрометра МК350S. Для зміни кута спостереження використовували гоніофотометр GO2000. Результати досліджень показали, що переважна більшість світлодіодних ламп і світильників мають низькі рівні мерехтіння і не створюють ніяких ризиків для здоров'я людей, але окремі виробники виготовляють продукцію, що мають небезпечний рівень мерехтіння. Зроблені висновки про необхідність внесення в нормативні документи на світлодіодну продукцію вимог до граничних рівнів модуляції для різних частотних діапазонів. Через кутову неоднорідність спектрального складу випромінювання світлодіодів має місце і кутова неоднорідність глибини модуляції. На основі досліджень глибини модуляції в залежності від кута спостереження для різних конструкцій світильників зроблені рекомендації стосовно вдосконалення методик вимірювання.

**Ключові слова:** індекс мерехтіння, корельована колірна температура, модуляція світла, стробоскопічний ефект, часові світлові артефакти

### Вступ

**Постановка проблеми.** Швидка повторювана зміна яскравості світла в часі спричиняє такі відомі явища як мерехтіння (пульсації) та стробоскопічний ефект. Загальна назва цих явищ запропонована в [1] – часові світлові артефакти (temporal light artefacts, TLA). Терміном «мерехтіння» визначається зміна яскравості (або колірності) світла, що безпосередньо сприймається спостерігачем. «Стробоскопічний ефект» – це ефект який може стати видимим для спостерігача при освітленні рухомого об'єкта.

Джерела світла, які створюють мерехтіння або стробоскопічний ефект вважаються такими, що не можуть забезпечувати якісне освітлення. Як мінімум мерехтіння створює дискомфорт, але воно може стати й небезпечною для здоров'я – спричиняти втому, напруженість очей, знижувати продуктивність зорових робіт, провокувати головний біль, мігрень, створювати неврологічні проблеми такі як епілептичні випадки, посилювати аутистичну поведінку у дітей та ін. [2-6].

Причинами TLA можуть бути як зовнішні чинники так і конструктивні особливості світлових приладів, зокрема режими живлення, конструкції пускорегулюючих апаратів (ПРА), електромагнітні шуми в мережах, широтно-імпульсне модулювання (ШИМ) при застосуванні регуляторів потужності (димерів) тощо.

В даний час для кількісної оцінки мерехтіння часто використовують глибину модуляції (modulation dept, MD) та індекс мерехтіння (flicker index, FI) [7], але в ряді публікацій показано, що обидва ці показники не повністю здатні об'єктивно оцінити рівень мерехтіння з точки зору як насправді вони сприймаються людиною [8].

Нової актуальності проблема мерехтіння набула після широкого впровадження в технології освітлення світлодіодів, особливо при використанні ШІМ для регулювання потужності світлодіодних ламп та світильників. При ШІМ модуляції звичайно використовуються частоти від 100 до 400 Гц, причому глибина модуляції становить 100 %. В порівнянні з лампами розжарювання (ЛР) та розрядними лампами (РЛ) мерехтіння світла світлодіодних ламп та світильників можуть суттєво відрізнитись через надзвичайно швидку реакцію зміни світлового потоку на зміну струму. Зміна настає через кілька наносекунд, в той час коли в РЛ вона сягає 200 мкс. Це може привести до помітних побічних ефектів які були менш помітними при освітленні ЛР та РЛ.

В [8] відзначається, що зараз важливо зрозуміти як модуляція світла світлодіодів впливає на здоров'я людини і як впливають технологічні фактори на модуляцію світла цих джерел.

Це стосується перш за все пристроїв в яких використовуються ШІМ, пульсацій вихідного струму випрямлячів з ємнісними та індуктивно-ємнісними фільтрами та ін.

Зважаючи на актуальність проблеми Міжнародна комісія з освітлення (МКО) в 2011 р. створила технічний комітет ТК 1-83 «Visual aspects of time-modulated lighting systems», який розробив дорожню карту досліджень пов'язаних з модуляцією світла, що необхідні для розроблення міжнародних стандартів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** МКО на основі узагальнення результатів останніх досліджень TLA в Технічних записках [1] рекомендував нові уточнені визначення понять мерехтіння та стробоскопічного ефекту, що відрізняється від термінів наведених в [9]. Зокрема, МКО визначає термін мерехтіння як сприйняття візуальної нестабільності, викликаной світловим подразником, яскравість або спектральний розподіл якого коливається з часом, для статичного спостерігача в статичному середовищі. Мерехтіння – це один з типів TLA. Стробоскопічний ефект – це зміна сприйняття руху, викликаного світловим стимулом, яскравість або спектральний розподіл якого коливається з часом, для статичного спостерігача в нестационарному середовищі. Для прямокутної періодичної флуктуації яскравості рухомі об'єкти сприймаються як дискретні (а не безперервні) переміщення. Якщо частота періодичних коливань яскравості збігається з частотою обертання об'єкта та цей об'єкт сприймається як статичний.

Третій тип TLA – це фантомний ефект масиву, що визначається як зміна сприйнятої форми або просторових позицій об'єктів, яскравість або спектральний розподіл яких коливається з часом для нестатичного спостерігача в статичному середовищі.

В [7] аналізуються результати досліджень біологічних ефектів мерехтіння в нових технологіях світлодіодного освітлення. Вплив мерехтіння на здоров'я людей може розділити на такі, що є результатом короткочасного впливу (епілептичні випадки) і такі, що є результатом тривалого впливу, наприклад, головний біль, порушення зору, втому при виконанні зорових робіт. Перші викликаються ви-

димим мерехтінням, як правило в діапазоні частот ~ 3 Гц–70 Гц, а другі з невидимою модуляцією світла на частотах вище тих, на яких візуально сприймається мерехтіння. Біологічний вплив на людину – це функція глибини модуляції, частоти мерехтіння, яскравості та інших факторів. В роботі [3] узагальнено результати досліджень щодо впливу мерехтіння на біологічні процеси та умови їх виникнення. Зокрема, відзначається, що в діапазоні частот 3 Гц–70 Гц до ризиків належать судоми у осіб які мають діагноз епілепсії, а також деякі специфічні неврологічні симптоми в тому числі нездужання та головний біль. Менш очевидними біологічні ефекти виникають при дії невидимого мерехтіння. Це перенапруження очей, втома, головний біль. Візуальне мерехтіння – небажаний атрибут для будь-якої системи освітлення, а ризики залежать від глибини модуляції і інших параметрів мерехтіння, наприклад, від поля зору.

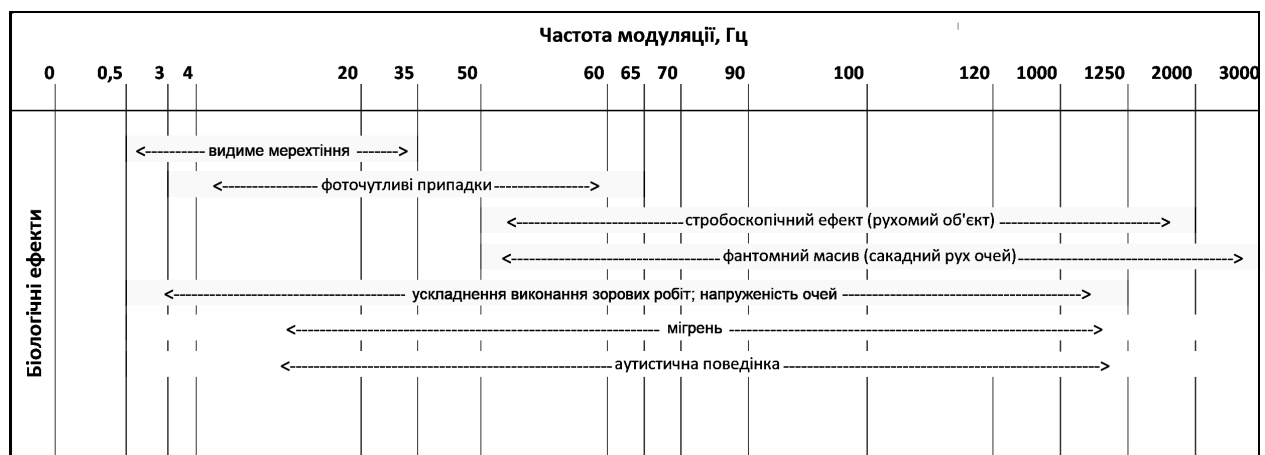
**Мета статті** – дослідження параметрів мерехтіння та видимості стробоскопічного ефекту створених світлом світлодіодних ламп та світильників, що поступають на ринок України, впливу конструктивних особливостей ламп та світильників на рівень мерехтіння та особливостей вимірювання глибини модуляції світла з врахуванням просторової неоднорідності випромінювання світлодіодів.

### Основна частина

Точкові джерела світла мають меншу ймовірність викликати судоми та головний біль, ніж розсіяне світло, яке охоплює більшу частину сітківки ока. Найбільша ймовірність виникнення епілептичних випадків припадає на частоти 15-20 Гц. Незначні ризики мають місце також при низьких яскравостях (менше  $1 \text{ кд/м}^2$ ) і монотонно зростають при зростанні яскравості. Червоне мерехтіння з великою глибиною модуляції та чередуванні червоних та синіх спалахів можуть бути особливо небезпечними.

В табл. 1 наведені інтервали частот в яких виникають різні біологічні ефекти.

Таблиця 1 – Біологічні ефекти, що виникають при різних частотах модуляції світла



В [2] сформульовані критерії, які можуть пом'якшити біологічні ефекти мерехтіння світла при використанні світлодіодних ламп та світильників.

Мерехтіння залежить від параметрів драйверів (ПРА), що застосовуються в лампах та світильниках, системах управління освітленням (димерах) та ін-



ших зовнішніх впливів (якості напруги в електромережі, електричних завад, що створюються різними споживачами електроенергії та ін.). Проблеми з мерехтінням доцільно вирішувати в кожному випадку індивідуально.

Мерехтіння має найбільше значення в загальному освітленні житлово-побутових приміщень, дитячих, шкільних та медичних закладів, промислових приміщень з рухомою технікою та робочих місць з напруженою зоровою роботою та ін. Критерії низького ризику мерехтіння світла та методи їх оцінювання рекомендовані в наступних нормативних документах [10-14].

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки [7] узагальнив дані багатьох незалежних досліджень і сформулював такі критерії:

1) глибина модуляції

$$Mod \% = (L_{max} + L_{min}) / (L_{max} - L_{min}) \times 100$$

де  $L_{max}$ ,  $L_{min}$  – відповідно максимальна та мінімальна яскравість, що відповідає низькому рівню ризику на частотах нижчих ніж 90 Гц має не перевищувати числові значення (у відсотках), що визначаються з виразу

$$Mod \% \leq 0,025 \cdot f, \quad (1)$$

( $f$  – частота модуляції);

2) при  $f > 90$  Гц допустима глибина модуляції визначається із виразу

$$Mod \% \leq 0,08 \cdot f, \quad (2)$$

На основі сформульованих критеріїв в [7] рекомендовані такі практики.

**Рекомендована практика 1.** Для обмеження можливих несприятливих біологічних ефектів глибина модуляції не повинна перевищувати  $0,025 \cdot f$  для частот нижче 90 Гц. В інтервалі частот 90–1250 Гц глибина модуляції має бути чисельно менше  $0,08 \cdot f$ ; вище 1250 Гц по глибині пульсації обмежень немає.

**Рекомендована практика 2.** Якщо потрібно забезпечити рівень NOEL (No observable effect level) (відсутній будь-який біологічний вплив на організм людини), то слід зменшити пульсації в 2,5 рази в порівнянні з рекомендованою практикою 1, тобто:

- нижче 90 Гц – глибина пульсації має бути менше  $0,01 \cdot f\%$ ;
- в межах від 90 Гц до 3000 Гц – глибина пульсації має бути меншою  $0,0333 \cdot f\%$ ;
- вище 3000 Гц обмеження на пульсації відсутні.

**Рекомендована практика 3.** (запобігання виникнення фоточутливих епілептичних випадків). Глибина модуляції для частот нижче 90 Гц має бути менше ніж 5%. Для врахування коливань форми хвилі використовують FI. Він встановлює зміну яскравості протягом періоду відносно її середнього значення. FI визначається як відношення площі  $S_1$  до суми  $S_1 + S_2$  (рис. 1.). Для якісного освітлення FI не повинен перевищувати значення 0,1.

Головним недоліком методики оцінювання мерехтіння наведеної в [7] є те, що вона не враховує сприйняття мерехтіння в залежності від частот.

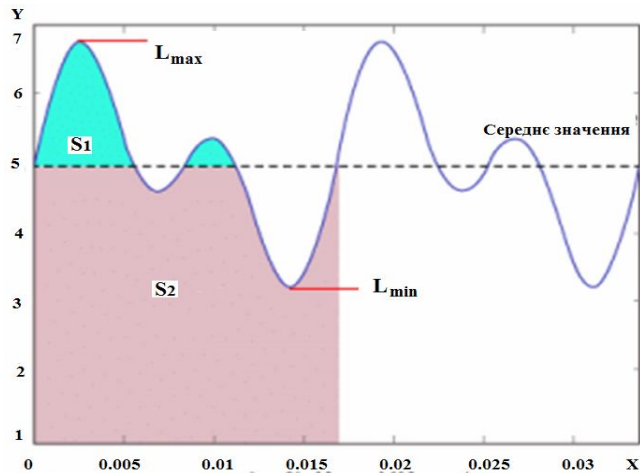


Рис. 1. До визначення глибини модуляції та індексу мерехтіння FI.

В [14] рекомендується об'єктивний метод для оцінювання мерехтіння з врахуванням його сприйняття спостерігачем на різних частотах в діапазоні 3–60 Гц. На рис. 2. наведено порогові значення модуляції виявленні з ймовірністю 50% в залежності від частоти. На графіку (б) – чутливість до виявлення мерехтіння, розрахована із експериментальної залежності виявлення модуляції (рис. 2).

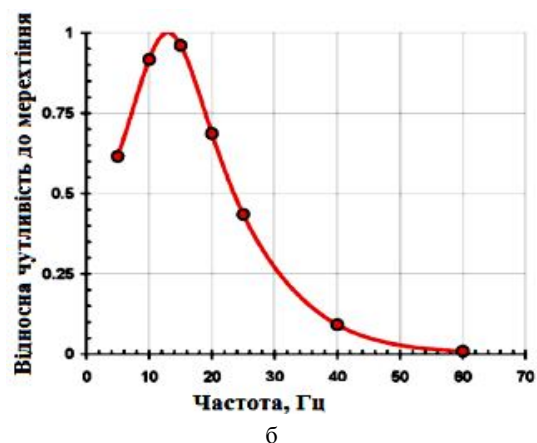
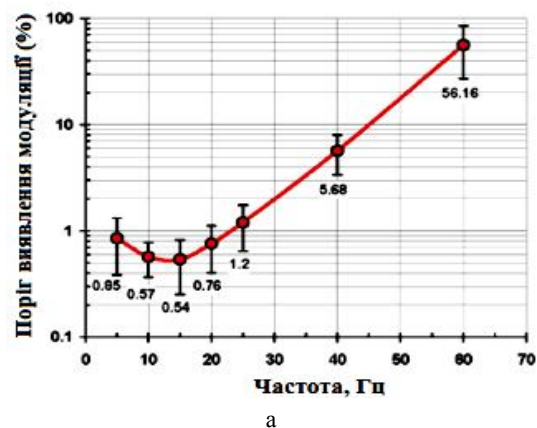


Рис. 2. Порогові значення модуляції при різних частотах – (а) та чутливість до виявлення мерехтіння – (б) [14].

Як видно з рис. 2. при частоті 15 Гц спостерігач може виявити мерехтіння при відносній глибині модуляції 0,5%, тоді як при частоті 60 Гц для вияв-

лення мерехтіння потрібна модуляція майже 60 %. Результуючі значення модуляції для кожної частоти виражаються через пороги виявлення і позначають як  $M_{pk}$ .

Модуляція, що сприймається і відповідає пороговому значенню (виявляється з вірогідністю 50 %) приймається за одиницю. При значеннях менших одиниці виявити мерехтіння не можливо, а при значно більших – виявляється легко. Якщо мерехтіння в інтервалі 3–60 Гц має різні частоти, то результуюче сприймання модуляції  $M_p$  визначають як

$$M_p = \sqrt{\sum_k (M_{pk})^2} \quad (3)$$

де  $k=1, 2, 3 \dots$

Результуюче значення  $M_p$  інтерпретується так само, як і  $M_{pk}$  для окремих частот: при  $M_p=1$  – порогові значення, що виявляються з вірогідністю 50 %; при  $M_p < 1$  – мерехтіння не видимі; при  $M_p > 1$  – мерехтіння виявляється легко.

В [12, 15] описаний об'єктивний метод оцінювання мерехтіння світла, що ґрунтується на стандартах, в яких встановлені методи вимірювання та вимоги до приладів для точного сприйняття коливання напруги [16]. Мерехтіння оцінюється короткотерміновим показником мерехтіння (short-term flicker indicator,  $P_{st}$ ), світлові параметри якого виміряні за допомогою флік метра, що відповідає вимогам [16]. Позначається цей показник  $P_{st}^{LM}$ . За результатами вимірювань інтерпретація випробування наступна:

– при  $P_{st}^{LM}=1$  досліджуване джерело світла має рівень мерехтіння, який виявляє спостерігач з вірогідністю 50 %, такий як і в лампах розжарювання потужністю 60 Вт;

– при  $P_{st}^{LM} < 1$  – джерело світла має рівень мерехтіння нижчий, ніж у ламп розжарювання потужністю 60 Вт;

– про  $P_{st}^{LM} > 1$  – рівень мерехтіння вищий ніж у ламп розжарювання і його легко виявити.

Що стосується оцінювання стробоскопічного ефекту, то об'єктивний метод вимірювання видимості стробоскопічного ефекту (stroboscopic effect visibility, SVM) запропонований в стандарті [13]. Розглянуті в цьому документі умови виникнення стробоскопічного ефекту обмежуються оцінкою при освітленостях більше 100 лк та при помірних швидкостях об'єкту (<4 м/с). SVM не оцінюється впливи мерехтіння на здоров'я і не є мірою для оцінки небезпек стробоскопічних ефектів в промисловості. Метод розрахований для оцінки TLA в офісах, житлових приміщеннях та аналогічних умовах.

Числові значення SVM можуть коливатись в межах від 0 до 9. При SVM = 0 будь-яка модуляція світла відсутня, тоді як при SVM  $\approx$  9 модуляція прямокутної форми (з безкінечно малою тривалістю імпульсу) дорівнює 100 %.

Результати SVM можна інтерпретувати наступним чином [13]:

– при SVM=1 – стробоскопічний ефект, що створює модуляція світла є на порозі видимості. Це означає, що середній спостерігач може виявити стробоскопічний ефект з ймовірністю 50 %;

– якщо значення SVM < 1, то ймовірність виявлення менша 50 %, а якщо SVM > 1 – то ймовірність буде вищою 50 %.

На рис. 3 наведені граничні рівні модуляції згідно з критеріями установленими в [7]. Тут же наведена лінія безпечного рівня мерехтіння, що оцінюється за допомогою  $P_{st}^{LM}$  та умови видимості стробоскопічного ефекту SVM.

Рівень модулювання, при якому відсутні будь-які біологічні впливи на організм людини має бути в 2,5 рази менший, ніж визначений виразами (1) та (2).

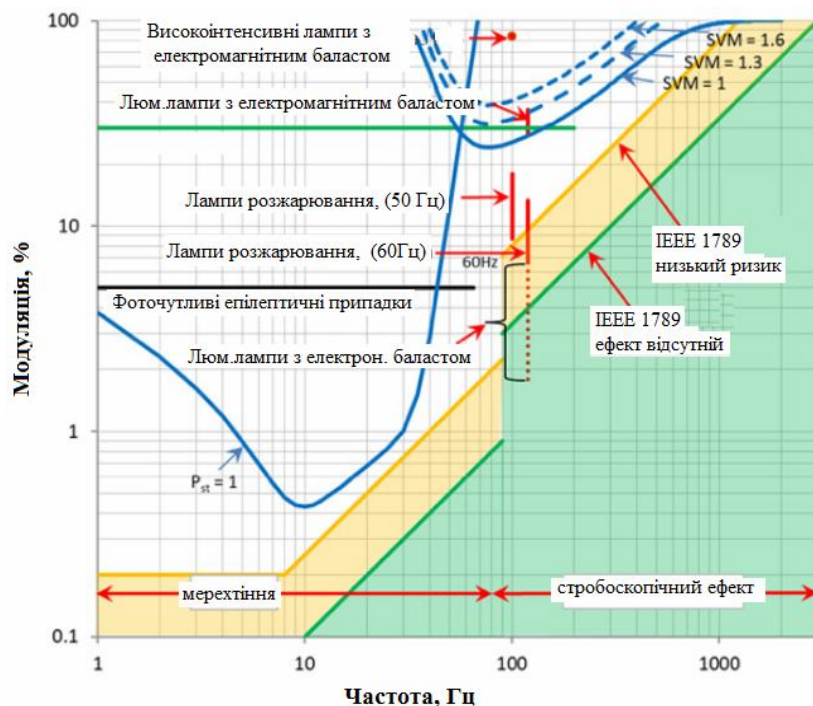


Рис. 3. Граничні рівні глибини модуляції за стандартами [7, 12, 13]

Слід також зазначити, що рівень сприймання TLA може бути набагато вищою межею видимості. Сприймання залежить від тривалості впливу, швидкості руху об'єкту та інших факторів [13].

Із порівняння вимог різних нормативних документів до низького рівня ризику, що створює мерехтіння або рівня NOEL видно, що найбільш жорсткими вони є в стандарті [7]. Навіть лампи розжарювання, в яких глибина модуляції на частоті 100 Гц становить 12-15% не відповідають вимогам рекомендованої практики 1 цього стандарту. Тому в ряді публікацій, наприклад, в [17] пропонується замість показників MD та FI запропонованих в [7] використовувати для оцінювання рівня мерехтіння  $F_{st}^{LM}$ , а для стробоскопічного ефекту – SVM. Ці вимоги менш жорсткі, враховують частоту, форму хвилі і які фактично можуть передбачити видимість мерехтіння та стробоскопічного ефекту.

Дослідження причин, що спричиняють модуляцію в світлодіодних лампах та світильниках проводилось в багатьох наукових працях, огляд яких наведено в [1, 2, 7, 18]. Основними є конструкції драйверів, технологія регулювання світлових параметрів за допомогою димерів з використанням ШІМ, коливання напруги мережі живлення та завади викликані різними електричними споживачами, що приєднані до мережі живлення та ін. Фактори, що визначають видимість TLA залежать як від модуляції світла, частоти, форми хвилі так і від яскравості, кута зору та ін.

Для оцінювання ступеню мерехтіння виробники світлотехнічної продукції використовують як показники MD та FI так і  $P_{st}^{LM}$ , а для стробоскопічного ефекту – SVM. Результати дослідження пульсацій світлодіодних ламп та світильників наведено

також в [19 – 22]. В Україні для визначення рівня якості світла стосовно мерехтіння використовується лише один показник – коефіцієнт пульсації (користуючись термінологією МКО – це глибина модуляції), а показники, що спричиняють стробоскопічний ефект взагалі не нормуються.

Метою даної роботи є аналіз особливостей TLA світлодіодів, методів їх вимірювання та дослідження параметрів мерехтіння та стробоскопічного ефекту світлодіодних ламп і світильників, що поступають на ринок України з використанням методик наведених в [7, 13].

**Результати дослідження.** Нами досліджувалось мерехтіння, що створюють комерційні зразки світлодіодних ламп та світильників, які надходять на ринок України, а також просторова однорідність мерехтіння цих виробів. Для вимірювання глибини модуляції мерехтіння та показника видимості стробоскопічного ефекту використовували спектрометр МК350S, а для зміни кута спостереження – гоніофотометр GO 2000. Вимірювання параметрів мерехтіння під різними кутами спостереження проводили через інтервал 10 градусів при рівні освітленості не нижче 40 лк.

Усереднені показники мерехтіння – глибину модуляції MD, індекс мерехтіння FI та показник видимості стробоскопічного ефекту SVM – вимірювали з використанням фотометричних куль діаметрами 1,5 м та 3 м. Результати вимірювання цих показників наведені в табл. 2.

Ризики впливу мерехтіння на організм людини оцінювали на частоті з найбільшою глибиною модуляції у відповідності з рекомендаціями [7]. Ці дані наведені на рис. 4.

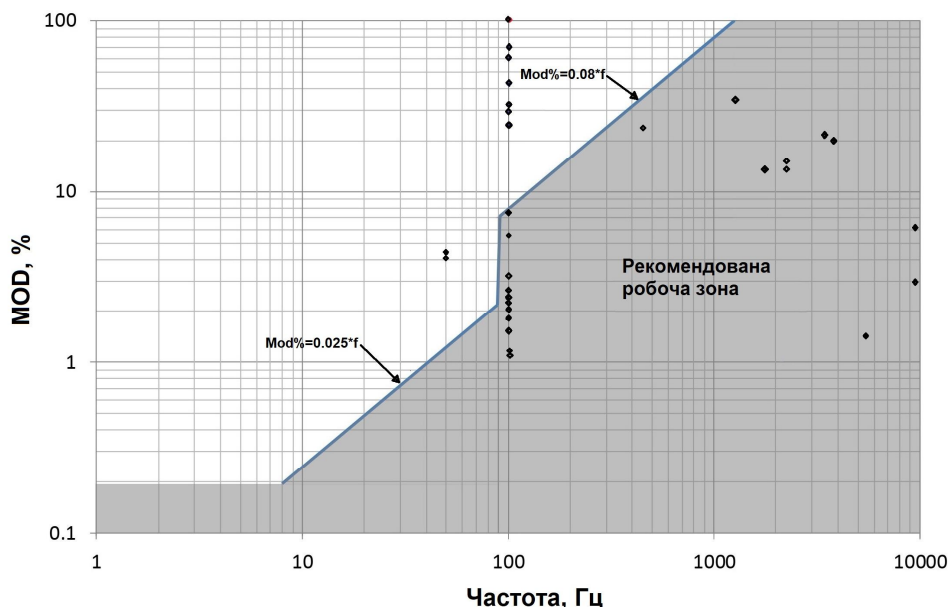


Рис. 4. Оцінювання відповідності ламп та світильників рівню безпечності мерехтіння: затемнена зона – зона низького ризику модуляції

Більшість досліджених ламп та світильників мають найбільшу глибину модуляції на частоті 100 Гц. Модуляцію меншу за граничний рівень, що

відповідає низькому ризику та рівню NOEL (повна відсутність ризику) мають приблизно 70 % досліджених ламп.

Для світильників внутрішнього освітлення цей показник ще кращий, але прожектори та світильники зовнішнього освітлення в багатьох випадках мають незадовільний рівень.

В публікації [23] наголошується на важливості обмеження допустимого рівня мерехтіння світла світильників зовнішнього освітлення і перегляд діючих норм в цій сфері. Обмеження глибини модуляції і встановлення відповідних рівнів яскравості та освітленості дорожнього покриття стає новим інструментом забезпечення якості дорожнього освітлення. Мерехтіння спричиняє суттєвий вплив на учасників дорожнього руху, перш за все водіїв сучасних транспортних засобів, що обладнані моніторами. В цьому випадку до мерехтіння освітленості додаються мерехтіння яскравості і колірності моні-

торів, що знаходяться в полі зору водія. Наголошується, що небезпечність працездатності водія в умовах мерехтіння освітленості доріг багаторазово перевищують ризики роботи з монітором у офісі, де нормативно обмежується рівень мерехтіння освітленості.

Виходячи з цього, потрібно обмежувати рівень мерехтіння яскравості та показника видимості стробоскопічного ефекту для світильників зовнішнього освітлення, зокрема для освітлення вулиць та доріг.

Для порівняння зі світлодіодними лампами та світильниками були проведені дослідження параметрів мерехтіння та видимості стробоскопічного ефекту ЛР та компактних люмінесцентних ламп (КЛЛ). Середні значення вимірювань наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати вимірювання параметрів мерехтіння світла та показника стробоскопічної видимості SVM

Назва виробу	Номер зразка	Максимальна глибина модуляції, %	Частота для максимальної глибини модуляції, Гц	Індекс мерехтіння FI, відн. од.	SVM, відн. од.
Прожектор	1	100	100	0,486	5,01
	2	100	100	0,486	5,18
Світильники для зовнішнього освітлення	1	33,11	100	0,0976	1,1476
	2	36,73	1356	0,0988	0,0487
Світильники для внутрішнього освітлення	1	1,03	100	0,0014	0,0052
	2	2,36	100	0,0032	0,0254
	3	1,82	100	0,0033	0,0099
	4	2,6	100	0,0058	0,0697
	5	5,89	100	0,0081	0,0884
	6	22,3	400	0,0326	0,0307
	7	1,64	100	0,0031	0,0111
Світло-діодні лампи	1	14,95	2208	0,0353	0,0415
	2	14,28	1766	0,0355	0,0553
	3	15,73	2204	0,0354	0,0434
	4	43,12	100	0,1164	1,3940
	5	4,05	50	0,0040	0,0021
	6	3,41	100	0,0049	0,0345
	7	1,11	100	0,0263	0,5026
	8	2,00	100	0,0022	0,0092
	9	4,01	50	0,0043	0,0214
	10	6,14	9594	0,0087	0,0216
	11	10,87	3686	0,0305	0,0250
	12	11,39	3276	0,0307	0,0306
	13	1,49	5234	0,0033	0,0062
	14	3,00	9418	0,0067	0,0121
	15	2,31	100	0,0053	0,0115
КЛЛ	1	15,89	100	0,0200	0,1834
	2	11,91	100	0,0209	0,2383
	3	15,36	100	0,0221	0,2370
	4	11,50	100	0,0242	0,2857
	5	7,92	100	0,0164	0,1912
ЛР	сер. зн	11,80	100	0,0367	0,4497

Як бачимо у світлодіодних ламп та світильників ці показники більш безпечні ніж у КЛЛ та ЛР. Однак недоліком світлодіодних ламп та світильників є те, що глибина модуляції у них може бути від 0 до 100 %, а у ламп розжарювання, наприклад, не більше 25 %, у КЛЛ – не більше 20 %. У світлодіодів також можуть бути потенційно більшими і показники FI та SVM. Проблема тут в тому, щоб світлодіодні лампи та світильники з високим ступенем мерехтіння не потрапляли до споживачів. Більшість сучасних світлодіодних ламп та світильників мають низький рівень модуляції, який відповідає навіть самим жорстким вимогам рекомендованої практики 2 згідно з IEEE 1789:2015.

На сьогодні технології світлодіодного освітлення забезпечують найнижчий рівень мерехтіння порівняно з іншими технологіями і технічно можливо забезпечити виготовлення всієї світлодіодної продукції з низьким рівнем модуляції світла без суттєвого збільшення її вартості. Для цього, перш за все, необхідно встановити в нормативній документації відповідні вимоги, так як в даний час вони відсутні [24].

В більшості сучасних ламп і світильників для загального освітлення використовуються світлодіоди, що випромінюють синє світло, яке частково, за допомогою люмінофора, перетворюється в жовто-зелене. Співвідношення синього і жовто-зеленого світла, що виходить за межі світлодіоду і визначає його колірність. Синє світло, що випромінюється кристалом світлодіоду під малими кутами до оптичної осі, розповсюджується в люмінофорі по більш короткому шляху, тому при малих кутах спостереження (ближче до оптичної осі) буде більше синього світла, а при великих кутах (ближче до 90°) – більша частка випромінювання люмінофору. Це призводить до кутової нерівномірності колірності світла. А так як постійна часу для синього випромінювання світлодіоду на кілька порядків менша часу випромінювання люмінофору, то при пульсаціях струму мерехтіння світла, що випромінюється кристалом і люмінофором може мати різну глибину модуляції і це буде створювати кутову нерівномірність глибини модуляції.

Результатами наших досліджень підтверджено наявність такого ефекту.

Дослідження кутової неоднорідності і індексу мерехтіння проводили на світлодіодних лампах та світильниках без світлорозсіювачів елементів та з дифузними світлорозсіювачами. За допомогою дифузних розсіювачів світла можна досягти рівномірної колірності світла і навіть збільшити частку короткохвильового світла при великих кутах спостереження.

Зміну співвідношення в спектрі між синім та жовто-зеленим світлом під різними кутами спостереження оцінювали за значеннями корельованої колірної температури (CCT) – при високих колірних температурах переважає синя складова світла і навпаки. На рис. 5 наведені результати вимірювання CCT та глибини модуляції світла від кута спостереження. Як видно з рис. 5, зміна колірної тем-

ператури і глибини модуляції від кута спостереження мають подібний характер.

Флікер-індекс FI змінюється від кута спостереження приблизно на такі ж відсотки як і глибина модуляції.

Різниця між максимумом та мінімумом глибини модуляції для різних досліджених зразків змінювалась від 1,8 % до 6 %. Це не дуже суттєва різниця, але для оцінки на відповідність вимогам нормативної документації це має значення, тому доцільно експериментально визначити і нормувати середнє значення глибини модуляції, індексу мерехтіння та SVM. Для вимірювання середнього значення параметрів мерехтіння краще застосовувати фотометричну кулю, так як цей метод значно економічніший, ніж з використанням гоніофотометра. Різниця між вимірюванням середнього значення глибини модуляції світла з використанням фотометричної кулі і розрахунком середнього значення за вимірюванням з використанням гоніофотометра не перевищує 3 %.

## Висновки

За результатами проведеного аналізу та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки.

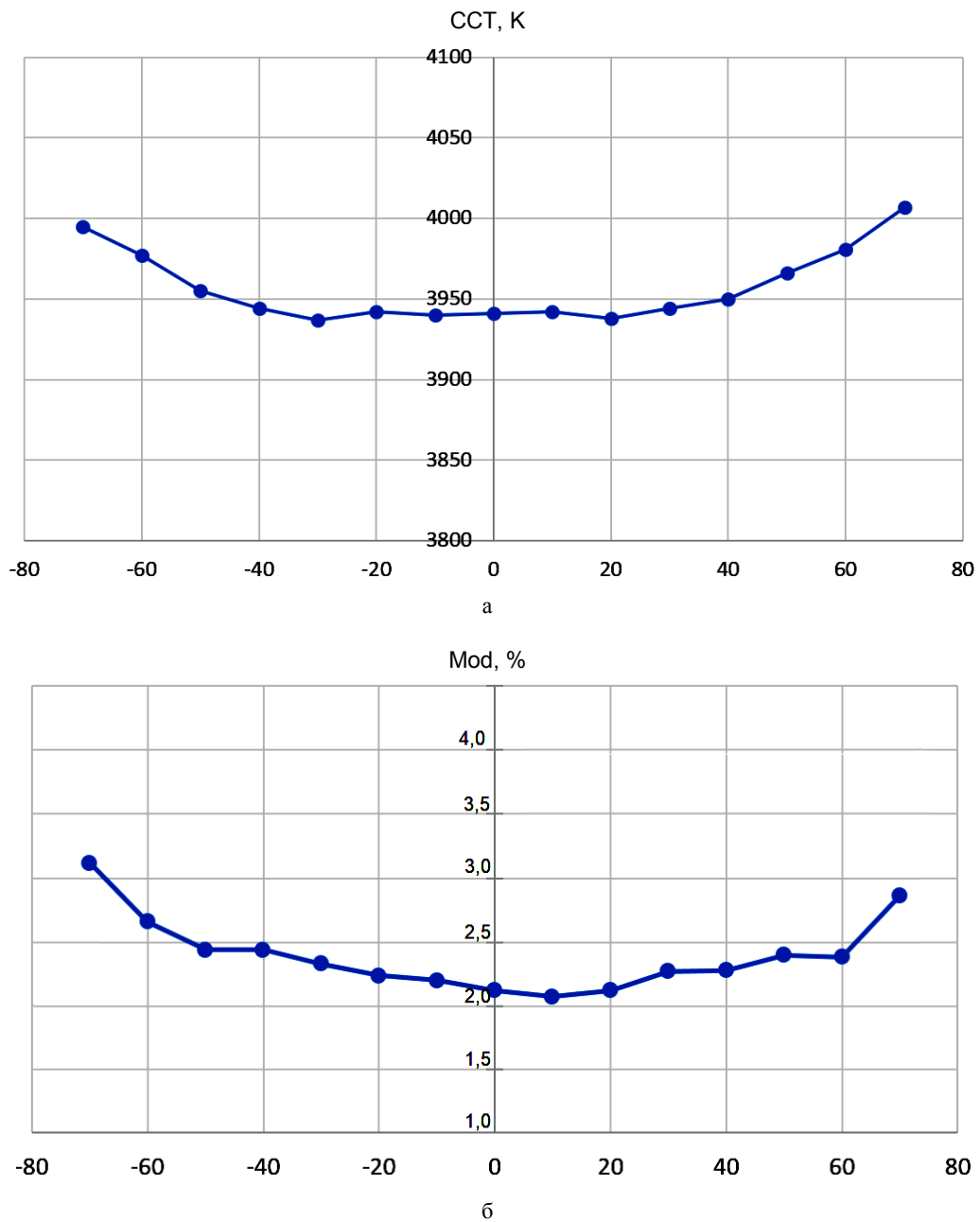
1. Часові світлові артефакти суттєво впливають на якість світла світлодіодних ламп та світильників. Вони можуть впливати не тільки на дискомфорт, але і на здоров'я людей – спричиняти головний біль, епілептичні припадки, втому, створювати стробоскопічний ефект та інше.

2. На сьогодні не існує рекомендацій МКО щодо єдиних вимог до безпечного рівня модуляції світла і методів вимірювання параметрів мерехтіння, але є цілий ряд рекомендацій міжнародних та національних організацій різних країн в яких запропоновані методи вимірювання та рівень безпечності параметрів мерехтіння світла та видимості стробоскопічного ефекту. До розроблення рекомендацій МКО тимчасово можна скористатись рекомендаціями таких стандартів як IEC/TR 61547-1:2015, IEEE 1789:2015, IEC/TR 62518:2017, рекомендаціями ASSIST, NEMA, Energy Star та ін.

3. На основі експериментальних досліджень встановлено, що більша частина світлодіодної продукції, що поступає на ринок України має безпечний рівень модуляції світла та показника видимості стробоскопічного ефекту.

4. Сучасний рівень технологій виробництва світлодіодної продукції має потенціал до подальшого зменшення рівня модуляції світла і забезпечення повної відсутності ризику від мерехтіння. Заміна ламп розжарювання та розрядних ламп на світлодіодні лампи та світильники дозволить повністю вирішити проблему мерехтіння та утворення стробоскопічного ефекту в освітленні.

5. Глибина модуляції світла світильників і ламп зі світлодіодами має просторову неоднорідність, тому вимірювання показників мерехтіння та видимості стробоскопічного ефекту доцільно проводити з використанням інтегруючої сфери.



**Рис. 5.** Залежність колірної температури  
(а – від глибини модуляції; б – від кута спостереження)  
для світлодіодної лампи з дифузним розсіювачем

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. CIE TN 006:2016 Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models.
2. Lehman, B. Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety [Text] / B. Lehman, A. J. Wilkins // IEEE Power Electronics Magazine. — 2014. — Vol. 1, № 3. — P. 18–26.
3. Wilkins A. J., Veitch J., and Lehman B., “LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update,” in Proc. IEEE Energy Conversion Congr. Expo., 2010, pp. 171–178. Wilkins A., Veitch J., Lehman B. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Atlanta: GA, 2010. P. 171–178.
4. Fisher R. S., Harding G., Erba G., Barkley G. L., and Wilkins A. Photic and pattern-induced seizures: A review for the Epilepsy Foundation of America working group,” *Epilepsia*, vol. 46, no. 9, pp. 1426–1441, Sept. 2005.
5. Harding G., Wilkins A. J., Erba G., GBarkley. L., and Fisher R. S., “Photic and pattern-induced seizures: Expert consensus of the epilepsy foundation of America working group,” *Epilepsia*, vol. 46, no. 9, pp. 1423–1425, Sept. 2005.
6. de Bittencourt P. R. M. Photosensitivity: The magnitude of the problem // *Epilepsia*, vol. 45, no. 1, pp. 30–34, 2004.
7. IEEE 1789-2015 Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers.



8. CIE TN 008:2017 Final Report CIE Stakeholder Workshop for Temporal Light Modulation Standards for Lighting Systems.
9. ДСТУ ІЕС 60050-845:2012 Международный словарь электротехнических терминов. Часть 845. Светотехника (ІЕС 60050-845:1987, ІДТ).
10. Energy Star, "ENERGY STAR Method of Measurement for Light Source Flicker," 2016.
11. NEMA 77-2017 Temporal light artifacts: test methods and guidance for acceptance criteria.
12. ІЕС TR 61547-1:2017 Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements - Part 1: An objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method.
13. ІЕС TR 63158:2018 Equipment for general lighting purposes - Objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment
14. ASSIST: Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies Recommended Metric for Assessing the Direct Perception of Light Source Flicker – January 2015 Volume 11, Issue 3.
15. ДСТУ EN 61000-3-3:2017 (EN 61000-3-3:2013, ІДТ; ІЕС 61000-3-3:2013, ІДТ) Електромагнітна сумісність. Частина 3-3. Гранично допустимі рівні. Нормування змін напруги, флуктуацій напруги і флікера в низьковольтних системах електропостачання загальної призначеності для обладнання з номінальним струмом силою не більше ніж 16 А на фазу, яке не підлягає обумовленому підключенню
16. ДСТУ EN 61000-4-15:2018 (EN 61000-4-15:2011, ІДТ; ІЕС 61000-4-15:2010, ІДТ) Електромагнітна сумісність. Частина 4-15. Методики випробування та вимірювання. Флікерметр. Технічні вимоги до функціонування та конструкції
17. NEMA Position Paper, Temporal Light Artifacts (Flicker and Stroboscopic Effects), 2015-06-15: <https://www.nema.org/news/Pages/NEMA-Lighting-Systems-Division-Publishes-Position-Paper-on-Temporal-Light-Artifacts.aspx>.
18. Castro, Ignacio & Vazquez, Aitor & Arias, Manuel & G. Lamar, Diego & Hernando, M.M. & Sebastián, Javier. (2019). A review on flicker-free ac-dc LED drivers for single-phase and three-phase ac power grids. IEEE Transactions on Power Electronics. PP. 1-1. 10.1109/TPEL.2018.2890716. Ignacio Castro, Aitor Vazquez, Manuel Arias, Diego G. Lamar, Marta M. Hernando, Javier Sebastian A review on flicker-free ac-dc LED drivers for single-phase and three-phase ac power grid // IEEE Transactions on Power Electronics ( Volume: 34 , Issue: 10 , Oct. 2019 ) Page(s): 10035 – 10057.
19. Арексис Л. О пульсациях выпускаемых ламп / Л. Арексис ,С. Китсинелис, Ж. Циссис / Светотехника. 2012. №3. С. 58-64.
20. Шаракшанэ А. С. Мамаев С. В. Нотфуллин Р. Ш.; Порубов А. В. Фактические значения пульсации освещенности, создаваемой современными источниками света//Оптический журнал. -2017. -84(1). – С.41-47.
21. Шпак С., Мартиросова В., Сахно Т., Кожушко Г., Дослідження пульсацій світлового потоку світлодіодних ламп та світлодіодних світильників. Промислова електроенергетика та електротехніка 2019. - 4-6.- С.22-27.
22. Shefer Alexander. Current-voltage characteristic and electroluminescence of UV LEDs 365 nm at liquid nitrogen temperature / Vitaly Veleschuk, Alexander Vlasenko, Zoya Vlasenko, Ihor Petrenko, Yevhen Malyi, Vladimir Borshch, Olena Borshch, Alexander Shefer // Optica Applicata, Vol. XLIX, No. 1, 2019. pp. 125-133.
23. Никифоров С. Семинар «Освещение улиц городов и автомагистралей. Стандарты и требования» Полупроводниковая светотехника. 2019, №6, С.16-18
24. Шпак С., Мартиросова В., Сахно Т., Кожушко Г., Напрямки вдосконалення стандартів на світлодіодну техніку та освітлення з її використанням. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, Том 1 № 154 (2020): Серія: Технічні науки та архітектура. С.57-66.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Flickering light and stroboscopic effect from LED lamps and light fixtures

S. Shpak, S. Kyslytsia, G. Kozhushko, T. Sakhno, S. Bagirov

**Abstract.** The paper analyzed the results of recent studies related to the effect of flickering light on the performance of visual work, well-being and human health. Besides, the authors described the methods for measuring the parameters of flicker and visibility of the stroboscopic effects, as well as safe levels of light modulation in different frequency ranges established by international standards. We studied the parameters of light flicker created by LED lamps and luminaires that are supplied to the Ukrainian market, the influence of the design features of these products on the level of flicker, and especially the measurement of light modulation taking into account the spatial heterogeneity of the LEDs. The modulation depth, flicker index, and stroboscopic effect visibility index were measured in accordance with the recommendations of the IEEE 1789:2015 and IEC/TR 63518:2018 standards using the MK350S spectrometer. To change the viewing angle, a GO2000 goniosphotometer was used. The obtained results showed that the vast majority of LED lamps and fixtures have low levels of flicker and do not pose any risks to human health, but some manufacturers produce products that have a dangerous level of flicker. Conclusions were drawn about the necessity to introduce into the regulatory documentation the requirements for the limits of the modulation levels related to different frequency ranges observed in the LED products. It was found that due to the angular inhomogeneity of the spectral composition of the LED radiation, the angular inhomogeneity of the modulation depth also takes place. Based on studies of the depth of modulation depending on the viewing angle for various designs of luminaires, recommendations were made on improving measurement methods.

**Keywords:** correlated colour temperature, flicker index, light modulation, stroboscopic effects, temporal light artefacts.



Bayramov A. A.<sup>1,2</sup>, Pashaev A. B.<sup>2</sup>, Sabziev E. N.<sup>2</sup>, R. R. Imanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Armed Forces War College of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup> Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

## THE MODEL OF OPTIMAL RADIOELECTRONIC STATIONS DEPLOYMENT IN THE MILITARY FIELD COMMUNICATION SITE

**Abstract.** There are two main problems during deployment of military field (mobile) communication site: 1) compact deployment radioelectronic stations (RESs) in communication site, 2) take into account of electromagnetic compatibility for normal processing of communication site that electric-field strength should be not exceed allowable standard. The necessity of packaged deployment is important especially for combat activities in mountains regions. In this case, hills and elevations can make worse a radio communication. Therefore, RESs should be deployed such that there are not natural obstacles between them. In given paper, there has been analysis of electric field superposition impact of all RES on each separate one for given radiation frequency range. The mathematical model of RES deployment with minimal distance between them with taking into account allowable standard of electric-field strength has been developed and offered. The program algorithm of calculation of RES deployment in the field communication site has been developed.

**Keywords:** field communication site, electric field, mathematical model, penalty method, packaged deployment, electromagnetic compatibility.

### Introduction

During deployment of military field (mobile) communication site, it should be take into account of two main factors:

- 1) compact deployment radioelectronic stations (RES) in communication site,
- 2) electromagnetic compatibility (EMC) for normal processing of communication site when the minimum distance between RESs is calculated.

The necessity of packaged deployment is important especially for combat activities in mountains regions. In this case, hills and elevations can make worse a radio communication. Therefore, RESs should be deployed such that there are not natural obstacles between them [1, 2].

The requisite of the minimum distance between RESs is conditioned that electromagnetic radiation of the antennas of close located RESs can form a high frequency electromotive force with amplitude of the several ten of Volts in radio receiver antenna. It creates an overload of input stages and a disturbance in RESs. The jointly influence of several signals, which form intermodulation interference in input stages of radio receivers and in output stages of radio transmitters, can be find themselves in communication operating frequency band and make worse receiving a desired signal. Therefore, the electric-field strength in RES location point does not exceed the allowable standard.

In given paper, there has been analysis of an electric fields superposition influence of all RESs to each separate one for given radiation frequency range. The mathematical model of the RESs deployment in a field communication site with minimum distance between theirs taking into account of allowable standard of electric field influence has been developed and offered. The program algorithm of RESs deployment in the field communication site has been developed.

### Analysis of RESs EMS in the field communication site

Let us use the group evaluation for analysis of RESs EMS in the field communication site [3]. When the EMS group evaluation there has been taken into account of all RESs interference on one RES inside the communication site.

When EMS evaluating, the determined description of electromagnetic condition (take into account of RES power) is used often, because power of interference sources, deployment and orientation of antennas in the site are strictly fixed [3, 4].

The calculation of RES EMS is carried out by the next order:

- calculation of energy characteristics (electric-field strength) of unpremeditated radio interference;
- determination of the level of electromagnetic compatibility providing.

The calculation of energy characteristics of radio interference stipulates determination of the power of combined radio interference reduced input of radio receiver of RES taking into account of radio interference penetration through an antenna-feeder device.

When EMS group evaluation, the total  $P_{i\Sigma}$  power of joint radio interference (including intermodulation interference) reduced input  $i$  radio receiver of RES from all other RES radio transmitters is calculated.

The determination of the level of RES EMS providing is carried out based on group evaluation of EMS.

The group evaluation of RES EMS is carried out by the next order:

- a) the total  $P_{i\Sigma}$  power of radio interference reduced  $i$  input of RES receiver is determined;
- b) the permissible level of  $P_{i\delta}$  power of radio interference reduced  $i$  input of evaluated RES is determined;
- c) the level of total power of radio interference is compared with the permissible level, and the level of

providing of the radio receiver EMS of evaluated RES is determined with other radio transmitters of RESs.

The providing index ([dB] or [W/Hz]) of EMS of the object RES is calculated by formula of

$$\Delta P_{i\Sigma} = P_{i\phi} - P_{i\Sigma},$$

when the group evaluating. This value describes a level of the EMS providing reserve (if it is positive) or a level of the EMS providing lack (if it is negative).

### The mathematical model of RES deployment in the field communication site

Let us consider a filed communication site where, for example, RESs works in frequency range of 2÷8 MHz, 30÷90 MHz and 4.4÷5 MHz. The calculation of electric-field strength in the high frequency range can be carried out for wave zone (radiation zone) when

$$d > \frac{2L^2}{\lambda},$$

where  $d$  is a distance between an antenna and a measurement point,  $L$  is the maximum size of an antenna,  $\lambda$  is a wave length.

The calculation of electric-field strength in radiation zone is carried out usually for electric component of field by Shuleykin-Van-der-Pole formula [5]:

$$E = 245 \frac{F \sqrt{P \cdot Ga}}{d} \left[ \frac{mV}{m} \right], \quad (1)$$

where  $E$  is electric-field strength,  $P$  is a power of transmitter,  $Ga$  is an antenna power gain,  $F$  is the propagation factor for electromagnetic energy loss in soil:

$$F = 1.41 \frac{2 + 0.3x}{2 + x + 0.6x^2},$$

In the short wave range when there is  $60 \lambda > \varepsilon$  condition,  $x$  is determined by the next formula:

$$x = \frac{\pi \cdot d}{\lambda \sqrt{\varepsilon^2 + (60 \cdot \lambda \cdot \sigma)^2}},$$

where  $\lambda$  is a length of wave in  $m$ ,  $\varepsilon$  is the relative dielectric constant,  $\sigma$  – is a radio wave conductivity in soil (see table 1).

Table 1

Kind of soil	$\varepsilon$	$\sigma, (\text{Ohm}\cdot\text{m})^{-1}$
Humid soil, plane surface	5 - 15	$3 \cdot 10^{-3}$
Humid soil with low green	4	$10^{-2}$
Dry soil, sand	2 - 10	$10^{-3}$
Soil covered by large unbroken forest	4	$10^{-3}$
Cities	3 - 5	$7,5 \cdot 10^{-4}$

For example, if the length of wave  $\lambda = 30$ , soil is dry, that is,  $\varepsilon = 10$  and  $\sigma = 10^{-3} (\text{Ohm}\cdot\text{m})^{-1}$ ,  $d < 1000$  m, then

$$F = 1.41 \frac{2 + 0.003x}{2 + 0.01d + 0.6 \cdot 10^{-4} d^2}, \quad (2)$$

Let us substitute (2) into (1), then the electric-field strength is calculated for  $d$  distance from RES.

This method of determination of electric-field strength by formulas (1) and (2) is applied for a circle radiation pattern and towards of maximum radiation of main beam.

Thus, if the field communication site with  $S$  area is considered and if there are  $N$  number of RES with  $P_i$  power radiation on this site, then the total level of electric-field strength in the  $i$  point of located RES is obtained

$$E_i = \sqrt{\sum_{j \neq i} E_j^2} = \sqrt{245^2 \sum_{j \neq i} \frac{50 \cdot F_j^2 \cdot p_j}{d_{ji}^2}},$$

where  $i = j = N$ ;  $E_j$  is an electric-field strength in radiation zone of  $i$  RES (1);

$d_{ji}$  is a distance between  $j$  radiated RES and  $i$  point;  $F_j$  is determined for each  $d_{ji}$  ( $d_{ji} = d_{ij}$ ).

For providing of electromagnetic compatibility condition, it is necessary that

$$E_i < PL_i,$$

where  $PL_i$  is the allowable standard of electric-field strength for given set.

**Formulation of the problem.** First of all, let us remember that in accordance with [5], the electric-field strength  $E$  at  $r$  distance can be calculated by next formula

$$E = \frac{W}{r},$$

where  $W$  is some constant described a RES power and

$$W = 0.008 \cdot F \cdot \sqrt{P \cdot Ga}.$$

If the sources of electromagnetic radiation create in given point electric field with  $E_i$  strength then the total electric-field strength in considered point is calculated by next formula [2]

$$E = \sqrt{\sum_{i=0}^N E_i^2},$$

It is necessary to determine such mutual RES deployment on the horizontal site that two conditions are satisfied:

1) the total electric-field strength in the point of each RES created other RESs doesn't exceed some allowable standard;

2) all RESs are deployed in the bounds of circle with the minimum radius.

**Mathematical formalization.** For analytical calculation of the mutual RES deployment, let us enter some Oxy Cartesian coordinate system.

Any RES deployment can be connected with coordinate system with any way. The located on the bond of circle with "the shortest radius" RESs are border's ones.

It is clear that:

– there are at least two RESs on the border;  
 – the considered two variants of mutual RES deployment are identical if they will coincident after application of the operations combination “rotation around of some point”, “parallel translation” and “symmetrical transformation relative to the some axis”.

So, as appropriate, making these conversions the center of the least circle is put in the origin of coordinates, and one of the border RES is put on the positive semiaxis  $Ox$ . Let us take  $(x_i, y_i)$  coordinates of  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  is a number of RESs) RES location in the  $Oxy$  coordinate system.

The demand of all RESs deployment in the range of some circle with a center in the origin of coordinates can be formulated in the following way as an inequality

$$x_i^2 + y_i^2 \leq r^2, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

where  $r$  is a required radius of a circle.

Let us considered that one of the RES, for example with number of  $i = 1$ , is located on the circle (3) and has  $(r, 0)$  coordinates, that is,

$$x_1 = r, \quad y_1 = 0. \quad (4)$$

By the task data, the sources of electromagnetic radiation must be deployed in that way that the part of each RES affect other one is minimum as far as possible.

This demand can be satisfied if the most power RES will placed on the edge of range. Therefore, placed in  $A_1(x_1, y_1)$  point the RES has most power  $W_1$ . All RESs form electric field  $E_j$  in the  $A_j(x_j, y_j)$  point

$$E_j^2 = \sum_{i \neq j} \left( \frac{W_i}{r_{ij}} \right)^2, \quad j = 1, 2, \dots, N,$$

where  $W_i$  is power of RES <sub>$i$</sub> ,

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

is Euclidean distance between RES <sub>$i$</sub>  and RES <sub>$j$</sub> .

Let us take  $E^*$  as the maximum permissible level of electric field strength in each RES point.

Then, there are normal operation conditions for RESs placed in  $A_j$  point

$$E_j \leq E^*, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

The task of optimal deployment of RESs can be formulated by next:

– to determine such  $x_i$  and  $y_i$  that for given  $W_i$  and  $E^*$  there are (3)-(5) conditions, and at the same time  $r$  is the least among possible ranges.

**The solution of task.** Firstly, let us rewrite (3)-(5) task as a task of conditional minimization relative to  $x_1, x_2, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_N$  variables:

$$F(x_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N) \equiv x_1^2 \rightarrow \min,$$

$$x_j^2 + y_j^2 - x_1^2 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

$$\sum_{i \neq j} \frac{W_i^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - (E^*)^2 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, N, y_1 = 0$$

Let us use the penalty function method [6, c.214-216] for solution this task.

Let us take it as:

$$\mathfrak{R}_k(x_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N) \equiv F(x_1, \dots, y_N) + \lambda_k \sum_{j=1}^N \max^2 \{0, g_j(x_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N)\} + \quad (6)$$

$$+ K_k \sum_{j=1}^N \max^2 \{0, G_j(x_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N)\},$$

$$g_j(x_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N) \equiv x_j^2 + y_j^2 - x_1^2, \quad (7)$$

$$j = 1, 2, \dots, N;$$

$$G_j(x_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N) \equiv \sum_{i \neq j} \frac{W_i^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - (E^*)^2, \quad (8)$$

$$j = 1, 2, \dots, N,$$

$\lambda_k$  and  $K_k$  are penalty parameters.

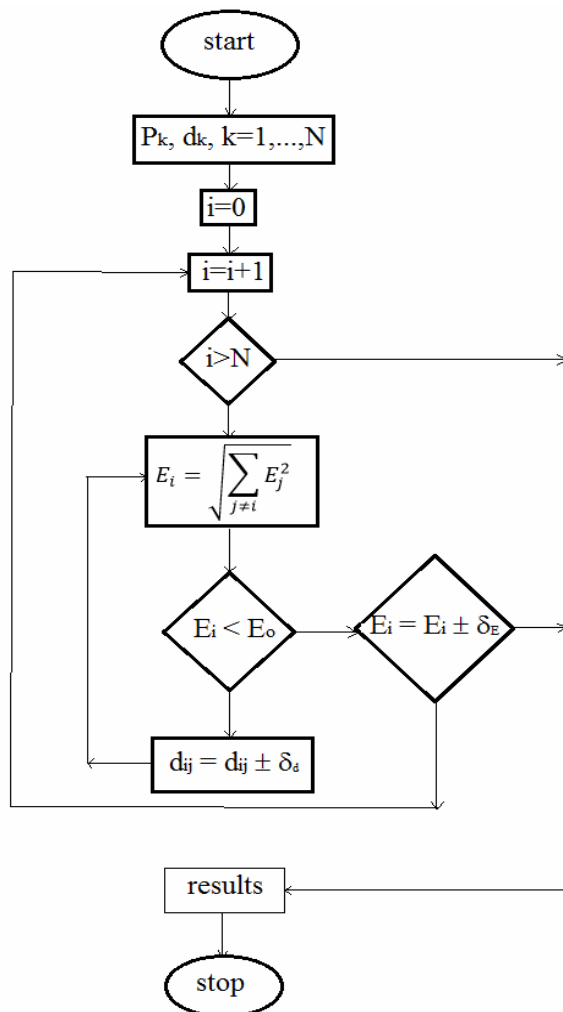
Given reasonable selection of initial data, the (6)-(8) solution sequence is converged to some “rational” solution in the case of  $\lambda_k, K_k \rightarrow \infty$ .

It should be noted that from the point of mathematical view the given task solution is not single. In order to prove this statement, let us construct a solution of the task of four given power RESs deployment for two variants.

There are power values of RESs deployed along circle with  $r = 200$  m radius in table 2.

Table 2

Variants	N	1	2	3	4
	Power of RES, W	168.5	187.9	19.3	122.9
I	Location point $(x, y)$	(200.00, 0.00)	(100.00, 173.21)	(-200.00, 0.00)	(-128.56, <b>153.21</b> )
	Formed in location point of RES electric-field strength $E$ , mV/m	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	0.90
II	Location point $(x, y)$	(200.00, 0.00)	(100.00, 173.21)	(-200.00, 0.00)	(-128.56, <b>-153.21</b> )
	Formed in location point of RES electric-field strength $E$ , mV/m	<b>1.00</b>	0.81	<b>1.00</b>	0.45



**Fig. 1.** The block chart of the program calculation algorithm of RESs deployment in a field communication site

Mathematical model of the optimal placement calculation of military field communication site. Сьома міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми інформатизації". Черкаси–Харків, 13-15 November 2019. vol.1, p.79.

- Radio spectrum control and wireless system electromagnetic compatibility. Tutorial / Ed. M.A. Bixovski. Moscow: Eko-Trends, 2006. 376 p.
- Evaluation theory and methods of wireless systems electromagnetic compatibility / Ed. Y.A. Feoktistov. — Moscow.: Radio and communication. 1988.
- Bayramov A.A., Ibragimov Z.A., Pashaev A.M. Radiation influence on human. Defence and prevention. NAA, «Chash-ioglu», Baku, 1999, 157 p.
- Elsterp K.-X., Reygart R., Shoyble M., Donar G. Non-linear programming introduction. Moscow: Nauka, 1985, 264 p.

#### REFERENCES

- Imanov R.R., Bayramov A.A. Ensuring electromagnetic compatibility of radio-electronic means in communications centers. "Съвременни предизвикателства пред сигурността и отбраната". Сб. Докл. от годишната научна конференция на факултет „Национална сигурност и отбрана“. Военна академия „Георги Стойков Раковски“, II part.17–18 май 2018. p.153-155.
- Imanov R.R., Bayramov A.A., Pashaev A.B., Sabziev E.N.

Надійшла (received) 24.01.2020

Прийнята до друку (accepted for publication) 25.03.2020

#### Модель завершення оптимальних радіоелектронних станцій в сайті зв'язку військового поля

А. А. Байрамов, А. Б. Пашаєв, Е. Н. Сабзієв, Р. Р. Іманов

**Анотація.** Під час розгортання військово-польового (мобільного) вузла зв'язку є дві основні проблеми: 1) компактні радіоелектронні станції (ВДЕ) компактної дислокації на вузлі зв'язку; 2) врахування електромагнітної сумісності для нормальної обробки вузла зв'язку, що напружує електричне поле не повинна перевищувати допустимого стандарту. Необхідність пакетованого розміщення важлива особливо для бойових дій у гірських районах. У цьому випадку пагорби та височини можуть погіршити радіозв'язок. Тому ВДЕ слід розгорнути таким чином, щоб між ними не було природних перешкод. У даній роботі проаналізовано вплив впливу всіх ВДЕ електричного поля на кожний окремих для заданого діапазону частот випромінювання. Розроблено та запропоновано математичну модель розгортання ВДЕ з мінімальною відстані між ними з урахуванням допустимого стандарту напруженості електричного поля. Розроблено програмний алгоритм розрахунку розміщення ВДЕ на польовому сайті зв'язку.

**Ключові слова:** польовий майданчик зв'язку, електричне поле, математична модель, метод штрафних санкцій, пакетне розгортання, електромагнітна сумісність

Б. В. Бакуменко, Б. І. Артемиченко, М. В. Сухоруков, Д. М. Мельник

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

## МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ЧАСУ НА ПЕРЕДИСЛОКАЦІЮ РАДІОТЕХНІЧНОГО ПІДРОЗДІЛУ З УРАХУВАННЯМ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ШТАТНИХ ЗМІН

**Анотація.** Стаття присвячена визначенню моделі розрахунку часу готовності окремого радіотехнічного підрозділу на призначені позиції. Існуюча модель розрахунку часу готовності підрозділу не враховує зміни організаційно-штатної структури радіотехнічного підрозділу та всі можливі часові затрати виконання заходів підготовки й виконання поставлених завдань. Існуюча методика розрахунку часу на передислокацію визначає лише порядок розрахунку передислокації окремих підрозділів і частин, але не може враховувати всі особливості підготовки та передислокації саме радіотехнічних підрозділів. Проведений аналіз етапів злагодження радіотехнічного підрозділу показав увесь перелік заходів, що виконуються, та які часові показники можуть бути враховані при розрахунку часу готовності. Розглянуті зміни в організаційно-штатній структурі радіотехнічного підрозділу дають можливість змінити та визначити модель розрахунку часу не тільки здійснення маршру, а в цілому часу готовності радіотехнічного підрозділу до виконання завдання на визначені позиції. Зміни організаційно-штатної структури привели до збільшення чисельності підрозділу, що дало можливість окремі заходи виконувати одночасно. Визначена модель порядку розрахунку часу готовності радіотехнічного підрозділу до виконання завдання надасть можливість набуття єдиного підходу до проведення розрахунків та врахування всіх можливих часових затрат виходячи з досвіду останніх років.

**Ключові слова:** радіотехнічний підрозділ, розрахунок часу готовності, модель розрахунку часу, передислокація.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Основними засобами здобування радіолокаційної інформації про повітряну обстановку в існуючій системі протиповітряної оборони держави є засоби радіолокації радіотехнічних військ (РТВ) Повітряних Сил (ПС) Збройних Сил України. Особлива роль в здобуванні радіолокаційної інформації належить радіотехнічним підрозділам (РТП) [1, 2]. Одне із важливих завдань радіотехнічного підрозділу це нарощування радіолокаційного поля на визначених рубежах, напрямках та у визначеному районі [3, 4]. Аналіз застосування радіотехнічних підрозділів показав ряд суттєвих недоліків, що привело, в тому числі і до зміни організаційно-штатної структури взводу та процедури вибору позиції радіотехнічних підрозділів [3-10].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз літератури і публікацій свідчить про те, що на сьогодні в радіотехнічних частинах не існує єдиного підходу щодо моделі розрахунку часу готовності радіотехнічних підрозділів [3-10]. Станом на сьогодні в основному розрахунки часу готовності обмежені тільки розрахунком часу здійснення маршру радіотехнічних підрозділів [2]. При цьому не враховані зміни організаційно-штатної структури і всі можливі часові затрати на етапах підготовки та виконання поставлених завдань, а саме, здійсненні маршру та розгортання його і комплексної перевірки готовності до виконання завдання на визначені позиції [11].

Існуюча методика розрахунків часу готовності підрозділу [7] визначає лише порядок розрахунку передислокації не може враховувати особливості

підготовки та передислокації підрозділів РТВ.

**Мета статті** – аналіз виконання заходів в ході етапів злагодження радіотехнічного підрозділу та визначення моделі порядку розрахунку часу готовності до виконання поставленого завдання у новому районі (на визначеній позиції) з урахуванням всіх можливих часових затрат.

### Викладання основного матеріалу

Радіотехнічний підрозділ призначений для нарощування або посилення радіолокаційного поля радіотехнічної частини на найбільш імовірних напрямках польоту засобів повітряної загрози [2]. Радіотехнічний підрозділ виконує такі завдання:

- нарощування радіолокаційного поля над важливими об'єктами держави;
- посилення радіолокаційного поля на малих і гранично малих висотах на найбільш імовірних напрямках повітряної загрози;
- відновлення готовності радіотехнічних підрозділів [2].

До складу радіотехнічного підрозділу входять: обслуговування радіолокаційної станції (РЛС) або обслуговування радіолокаційної станції; обслуговування радіолокаційного висотоміра (РПВ) та засобів зв'язку.

Для здійснення маршру радіотехнічного підрозділу шикуються в похідну колону. Варіант побудови похідної колони радіотехнічного підрозділу представлений на рис. 1. Порядок шиккування похідної колони: розвідувальний дозор; основна колона (обслуга(и) зв'язку, обслуга(и) РЕТ); обслуга технічного забезпечення.



Рис. 1. Варіант побудови похідної колони радіотехнічного підрозділу

Дистанція між автомобілями в колоні радіотехнічного підрозділу залежить від швидкості руху, умов видимості і встановлюється в межах, що забезпечує безпеку руху (50...100 м).

Розвідувальний дозор діє на відстані, що забезпечує надійний зв'язок з основною колоною (доцільно 3...5 км). Після перевірки готовності радіотехнічного підрозділу до маршу командир підрозділу видає усний наказ на марш в якому вказує:

короткі дані про обстановку, що склалася, вихідний рубіж (ВР), склад і завдання розвідувального дозору (РД);

порядок проходження вихідного рубежу та рубежів регулювання (РР);

час і місце побудови і руху колони на марші, швидкість руху, час і місце привалів та відпочинку.

Аналіз виконання завдань радіотехнічного підрозділу в ході ведення АТО та ООС показав недоліки, які привели до змін організаційно-штатної структури взводу.

До складу радіотехнічного підрозділу введено включені і засоби зв'язку. Такі зміни привели до збільшення чисельності підрозділу. Практичні питання відпрацьовуються під час запланованих тактичних навчань з підрозділами РТВ та в ході проведення тренувань по залагодженню бойової обслуги.

З метою практичної підготовки особового складу до виконання поставлених завдань і переведення радіотехнічних підрозділів у зазначене положення проводиться злагодження бойової обслуги радіотехнічного підрозділу.

Злагодження проводиться поетапно:

1) етап підготовки радіотехнічного підрозділу до виконання поставленого завдання;

2) етап передислокації орлів на позицію;

3) етап розгортання радіотехнічного підрозділу на визначеній позиції (позиції призначення);

4) етап юстировки і орієнтування РЛС на позиції;

5) етап проведення технічного обслуговування і іспиту РЛС на працездатність, без включення передавальних систем або з випромінюванням на еквівалент;

6) етап комплексної перевірки готовності РТП.

На етапі підготовки радіотехнічного підрозділу до виконання поставленого завдання проводиться:

– перевірка укомплектованості взводу матеріально-технічними засобами;

– перевірка працездатності радіоелектронної техніки (РЕТ), засобів енергопостачання, автотранспорту, засобів зв'язку, вимірювальної апаратури;

– перевірка укомплектованості ЗІП;

– перевірка підготовки бойової обслуги до виконання нормативу розгортання (згортання) РЕТ.

На етапі передислокації:

перевіряється підготовка бойової обслуги до здійснення маршу на позицію призначення у різних умовах обстановки.

На етапі розгортання РТП перевіряється готовність особового складу радіотехнічного підрозділу по виконанню нормативу розгортання (згортання) РЕТ. На етапі юстировки й орієнтування РЛС: перевіряється правильність виконання особовим складом

операцій по юстировці і орієнтуванні РЛС; порядок перевірки точності орієнтування РЛС.

На етапі перевірки готовності радіотехнічного підрозділу:

– проводиться комплексна практична перевірка радіоелектронної техніки та засобів зв'язку;

– проводиться практичне виконання контрольного огляду та щоденного технічного обслуговування.

Особливістю цього етапу є суворе виконання послідовності операцій з випромінюванням на еквівалент або з включенням високого.

Етап комплексної перевірки радіотехнічного підрозділу проводиться з метою визначення здатності радіотехнічного підрозділу по видачі радіолокаційної інформації з установлених каналів зв'язку.

Для відпрацювання завдань по виявленню повітряних цілей, визначення їх координат, впізнаванню, супроводженню і видачі радіолокаційної інформації на старший командний пункт (КП), а також усуненню раптових відмов апаратури РЛС, що виникли в процесі підготовки до роботи, проводяться перевірки дій особового складу по ввідним.

Виходячи з того, що обслуги радіотехнічного підрозділу залучаються до виконання завдань бойового чергування у мирний час, доцільно проводити тренування з ведення радіолокаційної розвідки та видачі радіолокаційної інформації на КП радіотехнічної частини (підрозділу) на основних позиціях. При проведенні таких тренувань потрібно використовувати схеми зв'язку, що передбачені завданнями.

Відповідальність за готовність радіотехнічного підрозділу до виконання поставлених завдань несе командир, від якого формується підрозділ.

Найбільш важливими етапами є завчасна підготовка радіотехнічного підрозділу до виконання поставленого завдання та передислокація підрозділу у визначений район, на визначену позицію.

Для передислокації радіотехнічного підрозділу на визначену позицію здійснюється маневр своїм ходом, який називається маршем.

Марш – організоване пересування радіотехнічних підрозділів на автомашинах і тягачах в колонах по дорогам і шляхам з метою прибуття у визначений час до визначеного району (позиції) в готовності до виконання поставленого завдання.

Марш проводиться повним складом радіотехнічних підрозділів.

Можливості радіотехнічного підрозділу по здійсненню маршу характеризуються часом готовності  $T_{гом}$ , що затрачується на його переведення у похідне положення ( $T_{n.n.}$ ), часом здійснення маршу ( $T_{з.м.}$ ) і часом розгортання в бойовий порядок ( $T_{розг.}$ ) у новому районі. Вони залежать від складу радіоелектронної техніки, засобів зв'язку та матеріально-технічних засобів (МТЗ), наявності і можливостей транспортних засобів, протяжності маршруту, природно-кліматичних умов, пори року і часу доби, підготовки особового складу, завантаженості дорожньої мережі.

Аналіз змін організаційно-штатної структури радіотехнічного підрозділу показав, що час вико-

нання заходів переведення у похідне положення та розгортання в бойовий порядок можна скоротити. Це пов'язано з тим, що ряд заходів можна здійснювати одночасно. Наприклад, здійснювати згортання ЗРЛ і засобів зв'язку та завантаження МТЗ. Аналогічно одночасно можна здійснювати і заходи при розгортанні в бойовий порядок та розвантаженні МТЗ.

Для скорочення часу переведення в похідне положення командиром підрозділу, в складі якого перебуває радіотехнічний підрозділ, визначаються місця і порядок зберігання МТЗ, відповідальні особи за зберігання та порядок завантаження.

При отриманні завдання на здійснення маршруту радіотехнічним підрозділом з метою якісної та своєчасної підготовки та початку маршруту завчасно розробляються схема розміщення особового складу підрозділу та матеріально-технічних засобів.

МТЗ і документація завчасно підготовлені та зберігаються на складах (визначених місцях).

Разом з МТЗ, документацією знаходяться накладні (описи) на їх отримання під підпис визначеним посадовим особам.

Схема визначає порядок (послідовність) завантаження (розвантаження), місця розміщення, з урахування об'єму кузовів автомобілів (причепів) та враховує сумісність матеріально технічних засобів для спільного перевезення.

Для відпрацювання схем потрібні вихідні дані:

- чисельність особового складу підрозділу;
- склад радіоелектронної техніки, засобів зв'язку та автомобільної техніки (АТ);
- наявність МТЗ, їх об'єм, розміри та вага, які підлягають перевезенню;
- можливості АТ (об'єм кузова), причепів щодо розміщення МТЗ;
- сумісність окремих МТЗ, щодо спільного перевезення;
- вимоги щодо кріплення МТЗ для безпечного перевезення;
- заходи безпеки при перевезенні особового складу та майна;
- майно, що знаходиться при особовому складі.

Послідовність дій при переведенні в похідне положення та при розгортанні в бойовий порядок визначає безпосередньо командир радіотехнічного підрозділу, в складі якого знаходиться радіотехнічний підрозділ, виходячи з особливостей порядку, місць розміщення (знаходження) МТЗ, особливостей визначеної позиції та іншого. Єдиний підхід, щодо проведення розрахунку часу готовності радіотехнічного підрозділу, не визначений керівними документами, а розрахунок обмежений тільки проведенням розрахунку часу здійснення маневру на визначену позицію, що не відображає показників всіх часових затрат. Тому запропонована модель порядку розрахунку, яка враховує виконання всіх основних заходів, що впливають на готовність радіотехнічного підрозділу до виконання поставленого завдання, може бути впроваджений в усіх підрозділах РТВ.

Залежність можливостей радіотехнічного підрозділу по здійсненню маршруту представлена на рис. 2.



Рис. 2. Можливості радіотехнічного підрозділу по здійсненню маршруту

В цілому час готовності до виконання завдання в новому районі (на визначеній позиції) може бути розрахований як [12]:

$$T_{\text{гот}} = T_{\text{н.п.}} + T_{\text{з.м.}} + T_{\text{розг.}}, \quad (1)$$

де  $T_{\text{гот}}$  – час готовності до виконання завдання;  $T_{\text{н.п.}}$  – час переведення у похідне положення;  $T_{\text{з.м.}}$  – час здійснення маршруту;  $T_{\text{розг.}}$  – час розгортання радіотехнічного підрозділу.

Час переведення в похідне положення враховує час постановки завдання особовому складу підрозділу в тому числі і час прибуття у підрозділ, якщо сигнал оголошений в не робочий час, проведення інструктажу з особовим складом, згортання ЗРЛ і засобів зв'язку, завантаження МТЗ, шиккування похідної колони і віддачі усного наказу на маршрут та розраховується як

$$T_{\text{н.п.}} = t_{\text{пост.}} + t_{\text{зг.,зав.}} + t_{\text{шик.}} + t_{\text{нак.}}, \quad (2)$$

де  $t_{\text{пост.}}$  – постановка завдання обслузі радіотехнічного підрозділу, інструктаж особового складу;  $t_{\text{зг.,зав.}}$  – час згортання ЗРЛ, засобів зв'язку та завантаження МТЗ;  $t_{\text{шик.}}$  – час шиккування колони на маршрут;  $t_{\text{нак.}}$  – час віддачі наказу на маршрут;

$$t_{\text{зг.,зав.}} = \max\{t_{\text{зг.}}, t_{\text{зав.}}\},$$

$$t_{\text{зг.}} = \max\{t_{\text{зг.1}}, t_{\text{зг.2}}, \dots, t_{\text{зг.n}}\},$$

$$t_{\text{зав.}} = \max\{t_{\text{зав.1}} + t_{\text{зав.2}} + \dots + t_{\text{зав.m}}\}.$$

Час здійснення маршруту залежить від довжини маршруту, глибини колони, середньої швидкості руху, кількості і часу привалів та розраховується як

$$T_{\text{з.м.}} = (D_{\text{м}} + \Gamma_{\text{к}}) / V_{\text{к}} + t_{\text{пр.}}, \quad (3)$$

де  $D_{\text{м}}$  – довжина маршруту руху;  $\Gamma_{\text{к}}$  – глибина колони;  $V_{\text{к}}$  – середня швидкість руху колони;  $t_{\text{пр.}}$  – сумарний час привалів.

Час розгортання залежить від часу заняття бойового порядку, розгортання ЗРЛ, засобів зв'язку, розвантаження МТЗ, включення і проведення комплексної перевірки та розраховується за виразом (4):

$$T_{\text{розг.}} = t_{\text{розг.БП}} + t_{\text{розг.,розв.}} + t_{\text{вкл.,пер.}}, \quad (4)$$

де  $t_{\text{розг.БП}}$ ,  $t_{\text{розг.,розв.}}$  – часи розгортання в бойовий порядок та ЗРЛ і засобів зв'язку та розвантаження



МТЗ відповідно;  $t_{вкл.,пер.}$  – час включення ЗРЛ і засобів зв'язку та проведення комплексної перевірки з доповіддю про готовність до виконання завдання радіотехнічним підрозділом;  $n$  – кількість одиниць ЗРЛ та засобів зв'язку, що згортаються (розгортаються);  $m$  – кількість одиниць автомобілів (причепів), що підлягають завантаженню (розвантаженню).

$$t_{розг.,розв.} = \max \{t_{розг.}, t_{розв.}\};$$

$$t_{розг.} = \max \{t_{розг.1}, t_{розг.2}, \dots, t_{розг.n}\};$$

$$t_{розв.} = \max \{t_{розв.1} + t_{розв.2} + \dots + t_{розв.m}\}.$$

### Висновки

1. Таким чином, запропонована модель порядку розрахунку часу готовності радіотехнічного підрозділу до виконання поставленого завдання визначає єдиний підхід в усіх підрозділах РТВ до проведення оперативно-тактичних розрахунків, як в період підготовки до виконання поставленого завдання так і в

ході бойового застосування радіотехнічної частини в цілому.

2. Дана модель порядку розрахунку часу готовності орлів враховує:

– зміни які відбулися в організаційно-штатній структурі радіотехнічних підрозділів;

– виконання всіх основних заходів підготовки до здійснення маршруту та переведення в похідне положення;

– безпосередньо здійснення маршруту;

– розгортання в бойовий порядок в новому районі (на визначеній позиції) та перевірку готовності до виконання поставленого завдання.

3. Запропонована модель порядку розрахунку часу готовності може бути використаний в ході проведення оперативно-тактичних розрахунків і при підготовці до передислокації радіотехнічних підрозділів та частин РТВ в цілому.

4. Модель порядку розрахунку часу передислокації враховує постійні часові показники, які дають можливість оперативно провести розрахунки, при раптовій зміні позиції радіотехнічних підрозділів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Історія радіотехнічних військ та основи фахової підготовки: Навчальний посібник / Г.В. Худов, Ю.І. Рафальський, Б.В. Бакуменко та ін. / За ред. Г.В. Худова. – Харків: ХНУ ІС, 2018. – 188 с.
2. Тактика радіотехнічних військ: Навчальний посібник / За ред. Г.В. Худова. – Харків: ХНУ ІС, 2018. – 240 с.
3. Air Power Australia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.ausairpower.net](http://www.ausairpower.net).
4. Radartutorial.eu. Ingenieurbüro Christian Wolff [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu).
5. Indian Radar Systems: [Електронний ресурс] // WORLD DEFENCE – 2008. – № 8. – Режим доступу: <http://defenceanalyst.blogspot.com/2011/08/indian-radarsystems.html>.
6. LSTAR® Air Surveillance Radars [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.srcinc.com/whatwe-do/radar-and-sensors/lstar-air-surveillance-radar.html>.
7. Петрушенко М. М. Створення єдиного поля радіолокаційного контролю повітряного простору держави / М.М. Петрушенко, В.Д. Карлов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2010. – № 1(3). – С. 111-116.
8. Кучук Г.А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка / ГА Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ІС, 2005. – Вип. 5 (45). – С. 74-84.
9. 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.
10. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
11. Department of Defense Dictionary of Military and Ass. Terms. US NATO Military Terminology. – Chairman, 2006, 758 p.
12. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія / Ю. Я. Бобало, Б. Ю. Волочий, О. Ю. Лозинський, Б. А. Мандзій, Л. Д. Озірковський, Д. В. Федасюк, С. В. Щербовських, В. С. Яковина. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 300 с.

Received (Надійшла) 11.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.04.2020

### Model of calculation of time for re-translation of radio-technical unit with regard to organization and staff

B. Bakumenko, B. Artemyenko, M. Sukhorukov, D. Melnyk

**Abstract.** The article is devoted to defining a model for calculating the readiness time of a particular radio unit for assigned positions. The current model of calculating the unit's readiness time does not take into account changes in the organizational and staff structure of the radio engineering unit and all possible time costs for the implementation of the preparation and execution of tasks. The existing methodology for calculating the time for relocation defines only the procedure for calculating the relocation of individual units and parts, but it cannot take into account all the features of training and relocation of radio units. The analysis of the stages of harmonization of the radio engineering unit showed the whole list of measures taken and what time indicators can be taken into account when calculating the ready time. These changes in the organizational and staff structure of the radio engineering unit make it possible to change and determine the model for calculating the time not only of the march, but in general the readiness of the radio engineering unit to complete the task for certain positions. Changes in the organizational and staff structure led to an increase in the number of units, which made it possible to carry out individual measures at the same time. The defined model of the procedure for calculating the time of readiness of the radio-technical unit to perform the task will provide an opportunity to get a unified approach to carrying out calculations and to take into account all possible time costs based on the experience of recent years.

**Keywords:** radio engineering unit, standby time calculation, time calculation model, relocation.

О. В. Лемешко, М. О. Євдокименко, О. С. Єременко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЧУТЛИВОГО ДО ЗАТРИМОК ТРАФІКА В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

**Анотація.** У роботі запропоновано вдосконалену оптимізаційну модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. Новизною моделі є використання критерію оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією середньої міжкінцевої затримки пакетів. В основу зазначеного критерію оптимальності покладено математичний вираз, який дозволяє аналітично розрахувати середню міжкінцеву затримку з урахуванням характеристик мережного трафіка, типів дисциплін обслуговування пакетів на маршрутизаторах інфокомунікаційної мережі, пропускних здатностей каналів зв'язку. Також отримано умови забезпечення якості обслуговування за середньою міжкінцевою затримкою пакетів для будь-якого виду трафіка в умовах реалізації як одношляхової, так і багатшляхової маршрутизації. Отримати зазначені результати вдалося на підставі тензорного моделювання інфокомунікаційної мережі, коли тензори основних QoS-показників та метричні тензори розглядались у двох системах координат: гілок мережі та незалежних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Дослідження та порівняльний аналіз з іншими маршрутними рішеннями підтвердили більш високу ефективність удосконаленої моделі за показником середньої міжкінцевої затримки пакетів, що є важливим для чутливого до затримок трафіка, особливо в умовах високих навантажень на інфокомунікаційну мережу.

**Ключові слова:** інфокомунікаційна мережа, пакет, трафік, потік, маршрутизація, тензор, система координат, модель, затримка, канал зв'язку, пропускна здатність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Відмінною рисою сучасного інформаційного суспільства є постійне зростання об'єму та різноманітності даних, які циркулюють між споживачами інформації. У зв'язку з впровадженням нових сервісів та інформаційних технологій, наприклад, інтернету речей (Internet of things, IoT), машинної взаємодії (Machine-to-Machine, M2M) тощо, висуваються все більш високі вимоги до інфокомунікаційних систем і мереж, які складають матеріальну основу єдиного інформаційного простору [1, 2].

Як правило, вимоги споживачів інформації до інфокомунікаційних мереж (ІКМ) стосуються підтримки мобільності та безпеки сервісів, а також забезпечення заданого рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS). При цьому трафік різних мережних додатків по-різному чутливий до того чи іншого QoS-показника (табл. 1).

Таблиця 1 – Чутливість трафіка різних мережних додатків до значень QoS-показників

Додаток	Надійність	Середня затримка	Пропускна здатність
Електронна пошта	Висока	Низька	Низька
Передача файлів	Висока	Низька	Середня
Web доступ	Висока	Середня	Середня
Аудіо за вимогою	Низька	Низька	Середня
Відео за вимогою	Низька	Висока	Висока
Телефонія	Низька	Висока	Низька
Відеоконференція	Низька	Висока	Висока

У свою чергу, все більше інфокомунікаційних послуг є чутливими до затримок пакетів. У зв'язку з

цим, до показника міжкінцевої затримки пакетів висуваються спеціальні вимоги з боку мережних додатків (табл. 2). Крім того, в мережній термінології широко використовується поняття Delay-Sensitive Networks (DSN) – мережі, чутливі до затримок [3-12].

Для повноцінного функціонування DSN повинні використовуватись системні рішення щодо забезпечення заданих значень середньої міжкінцевої затримки пакетів (СМЗП). До них, перш за все, варто віднести механізми управління чергами (scheduling), розподілу каналного ресурсу (bandwidth allocation), профілювання трафіка (shaping/policing) та протоколи резервування ресурсів (RSVP) [6, 8-13].

Таблиця 2 – Вимоги мережних додатків щодо максимально допустимої міжкінцевої затримки пакетів

Додаток	Максимально допустима міжкінцева затримка пакетів
IPTV	100 мс
Відео за вимогою	50 мс
VoIP	150 мс
Відеоконференція	150 мс
Мережні ігри	50 мс
IoT	100 мс

Окремо значна роль відводиться протоколам маршрутизації, що відповідають за визначення шляхів, вздовж яких СМЗП не перевищувала б допустимих значень (табл. 2). Це особливо важливо, зважаючи на те, що затримка, як часовий QoS-показник, є адитивною метрикою. Тобто затримка пакетів вздовж шляху є сумою затримок у мережних елементах (каналах і маршрутизаторах), які складають обраний шлях [13]. Крім того, для підвищення надійності QoS-рішень використовують протоколи відмовостійкої маршрутизації, які паралельно з розрахунком основного шляху визначають множину

резервних шляхів, які використовуються у випадку виходу з ладу елементів основного маршруту [14].

Варто зазначити, що перелічені технологічні засоби, механізми та протоколи мають носити теоретично обґрунтований характер, базуючись на адекватних математичних моделях та ефективних розрахункових методах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як на рівні теоретичних, так і технологічних рішень, знайшли своє застосування досить багато самих різноманітних підходів до розв'язання задач маршрутизації трафіка, чутливого до затримок пакетів, в ІКМ. Спільною рисою відомих протоколів маршрутизації, що застосовуються в існуючих IP та MPLS мережах, є використання маршрутних метрик, які так чи інакше пов'язані з затримками пакетів у каналах зв'язку та використовуються алгоритмами Дійкстри та Беллмана-Форда для визначення найкоротших шляхів [15, 16].

У протоколі RIP (Routing Information Protocol) метрикою шляху фактично виступає кількість переприйомів пакетів. Тобто, чим менша кількість маршрутизаторів у розрахованому шляху, тим нижчу затримку відчує пакет. Ця гіпотеза досить справедлива в негетерогенних мережах, в яких канали зв'язку мають приблизно однакову пропускну здатність. У протоколі OSPF (Open Shortest Path First) метрика каналу зв'язку обернено пропорційна до його пропускну здатності [17, 18]. Тому найкоротший шлях, який буде протокол OSPF, як правило, має максимально можливу пропускну здатність серед усіх доступних маршрутів, що позитивно впливає і на затримки пакетів уздовж цього шляху.

З погляду задачі, що вирішується, протокол IGRP (Interior Gateway Routing Protocol) є найбільш ефективним, так як використовує композитні маршрутні метрики, які одночасно з пропускну здатністю та завантаженістю каналів зв'язку, враховують номінальні значення затримки пакетів [17, 18]. На жаль, номінальне значення затримки чітко прив'язано до типу інтерфейсу та його номінальної пропускну здатності та практично не залежить від реальної затримки пакетів на цій ділянці мережі.

Перспективним напрямом покращення рівня затримок пакетів в ІКМ є реалізація вимог концепції Traffic Engineering (TE), направлених на забезпечення збалансованого завантаження каналів зв'язку. Це досягається, як показано в роботах [19, 20], шляхом мінімізації верхнього порогу завантаженості (коефіцієнту використання) каналів зв'язку. Подібне рішення орієнтоване на запобігання утворення в ІКМ так званих «вузьких місць», тобто перевантажених ділянок, затримки пакетів на яких можуть стрімко зростати, що дуже негативно впливає на загальний рівень QoS в мережі.

Проте найбільш ефективним варіантом забезпечення мінімальної або заданої середньої міжкінцевої затримки пакетів, є подальший розвиток оптимізаційного підходу до розв'язання задач маршрутизації, коли значення цього важливого QoS-показника в явному вигляді входить або до критерія оптимальності, або до умов-обмежень, що наклада-

ються на відповідні маршрутні змінні. Однак основною проблемою при цьому стає отримання в аналітичному вигляді виразу для розрахунку СМЗП, в якому б адекватно та взаємопов'язано враховувались як основні параметри ІКМ, так і характеристики мережного трафіка.

Як показав проведений аналіз [21-26], досить ефективним підходом до моделювання та оптимізації процесів маршрутизації в ІКМ є застосування тензорної методології досліджень. Подібний підхід до моделювання систем з мережною структурою, а саме електричних кіл та електротехнічних пристроїв, запропонував американський вчений-інженер Г. Крон [28]. За останні 50 років його ідеї були використані, розвинені та адаптовані під системи різного функціонального призначення, в тому числі під проблематику інфокомунікацій [21-26].

З точки зору задачі маршрутизації, розв'язанню якої присвячене дане дослідження, у роботах [21-26] тензорна формалізація ІКМ дозволила отримати шукані вирази для розрахунку СМЗП та визначити умови забезпечення якості обслуговування як за зазначеним QoS-показником, так і за пропускну здатністю та ймовірністю втрат пакетів. Проте адекватність таких QoS-умов забезпечувалась лише у випадку обов'язкового використання всіх каналів зв'язку ІКМ, які враховувались при побудові тензорної моделі. Тому, як показано в роботах [21-26], область переважного використання раніше відомих тензорних рішень – це режим функціонування мережі, близький до перевантаження. Саме в цьому режимі варто використовувати багатозшляхову маршрутизацію із завантаженням всього доступного каналного ресурсу ІКМ. Тому пошук тензорних рішень задач QoS-маршрутизації чутливого до затримок пакетів трафіка, направлених на розширення області застосування їхнього ефективного використання, є актуальною науковою та прикладною задачею.

**Метою статті** є розробка оптимізаційної моделі маршрутизації трафіка, чутливого до затримок, в інфокомунікаційних мережах.

## Основна частина

**1. Тензорний опис інфокомунікаційної мережі.** Нехай структура ІКМ описується одновимірною мережею  $S = (U, V)$ , де  $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$  – множина вузлів, які моделюють маршрутизатори;  $m$  – загальна кількість вузлів у  $S$ ;  $V = \{v_z, z = \overline{1, n}\}$  – множина гілок мережі, які моделюють канали зв'язку ІКМ;  $n$  – загальна кількість гілок у  $S$ .

Полюси мережі  $S$  моделюють маршрутизатори, через які той чи інший потік пакетів надходить та вибуває із ІКМ. Введемо наступні позначення:  $\kappa(S)$  – кількість базисних міжполюсних шляхів в мережі  $S$ ;  $\Theta(S)$  – число внутрішніх вузлових пар в мережі  $S$ , що включає в себе всі вузлові пари, крім полюсної.

У випадку моделювання зв'язної ІКМ одновимірною мережею  $S$  її структурні характеристики пов'язані між собою такими виразами:

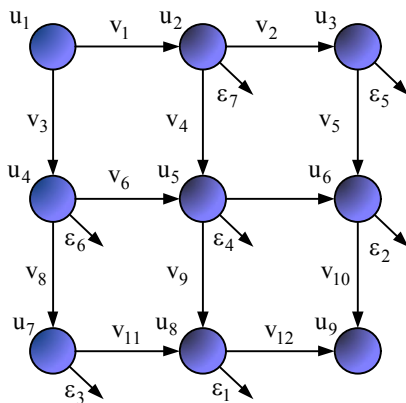
$$\kappa(S) = n - m + 2; \quad \vartheta(S) = m - 2. \quad (1)$$

Тоді на структурі ІКМ вводиться дискретний  $n$ -вимірний геометричний простір. У цьому просторі прийемо до уваги такі два типи ортогональних систем координат (СК) [21-26]:

– система координат гілок мережі  $\{v_z, z = \overline{1, n}\}$ , проєкції тензорів в якій будуть позначатися індексом  $v$ ;

– система координат міжполюсних шляхів  $\{\gamma_i, i = \overline{1, \kappa}\}$  та внутрішніх вузлових пар  $\{\varepsilon_j, j = \overline{1, \vartheta}\}$  мережі  $S$ , проєкції тензорів в якій будуть позначатися індексом  $\gamma\varepsilon$ .

Виконання умови  $n = \kappa(S) + \vartheta(S)$  з урахуванням (1) і визначає ортогональність цих систем координат. На рис. 1 показано приклад визначення для мережі  $S$  базисних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, коли полюсами виступали вузли  $u_1$  та  $u_9$ , а основні структурні характеристики приймали такі значення:  $n = 12$ ,  $\kappa(S) = 5$ ,  $\vartheta(S) = 7$ .



- $\gamma_1 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_3 \rightarrow u_6 \rightarrow u_9$
- $\gamma_2 : u_1 \rightarrow u_4 \rightarrow u_7 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9$
- $\gamma_3 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_5 \rightarrow u_6 \rightarrow u_9$
- $\gamma_4 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_5 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9$
- $\gamma_5 : u_1 \rightarrow u_4 \rightarrow u_5 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9$

Рис. 1. Приклад моделювання ІКМ одновимірною мережею з визначенням базисних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар

З метою отримання для кожного окремого потоку пакетів аналітичного виразу для розрахунку СМЗП у введеному  $n$ -вимірному просторі інфокомунікаційна мережа бути описуватись за допомогою змішаного двовалентного тензора [21-26]:

$$Q = T \otimes A, \quad (2)$$

де  $\otimes$  – оператор тензорного множення;  $T$  – одновалентний коваріантний тензор середніх затримок пакетів;  $A$  – одновалентний контраваріантний тензор середніх інтенсивностей потоків у координатних шляхах мережі.

Для зручності вираз (2) доцільно представляти також в індексній формі:

$$q_j^i = \tau_j \lambda^i, \quad (i, j = \overline{1, n}), \quad (3)$$

де  $\tau_j$  – середня затримка пакетів уздовж  $j$ -го координатного шляху ( $c$ );  $\lambda^i$  – середня інтенсивність потоку пакетів, які передаються уздовж  $i$ -го координатного шляху ( $1/c$ ). Компоненти тензора  $Q$  (2) пов'язані між собою за допомогою відповідних метричних тензорів [21-26]:

$$T = E\Lambda \quad \text{та} \quad \Lambda = GT, \quad (4)$$

де  $E$  – двічі коваріантний метричний тензор з координатами  $e_{ji}$ ;  $G$  – двічі контраваріантний метричний тензор з координатами  $g^{ij}$ .

Тензорні рівняння (4) у введених системах координат приймають відповідну векторно-матричну форму. Так у системі координат гілок мережі тензорні рівняння (4) набудуть такого вигляду:

$$T_v = E_v \Lambda_v \quad \text{та} \quad \Lambda_v = G_v T_v, \quad (5)$$

де  $\Lambda_v$  та  $T_v$  – відповідно проєкції тензорів  $\Lambda$  та  $T$  в СК гілок, які представлені  $n$ -вимірними векторами інтенсивності потоку та середньої затримки пакетів у каналах зв'язку ІКМ;  $E_v = \|e_{ij}^v\|$  – представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею проєкція двічі коваріантного метричного тензора  $E$  в СК гілок;  $G_v = \|g_{ij}^v\|$  – представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею проєкція двічі контраваріантного метричного тензора  $G$ . При цьому має місце таке правило:

$$E_v = [G_v]^{-1}, \quad (6)$$

де  $[\cdot]^{-1}$  – операція обернення матриці.

У базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар мережі тензорні рівняння (4) матимуть такий вигляд:

$$T_{\gamma\varepsilon} = E_{\gamma\varepsilon} \Lambda_{\gamma\varepsilon} \quad \text{та} \quad \Lambda_{\gamma\varepsilon} = G_{\gamma\varepsilon} T_{\gamma\varepsilon}, \quad (7)$$

де  $\Lambda_{\gamma\varepsilon}$  та  $T_{\gamma\varepsilon}$  – проєкції тензорів  $\Lambda$  та  $T$  у СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, які представлені  $n$ -вимірними векторами;  $E_{\gamma\varepsilon} = \|e_{ij}^{\gamma\varepsilon}\|$  – представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею проєкція двічі коваріантного метричного тензора  $E$  в СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар;  $G_{\gamma\varepsilon} = \|g_{ij}^{\gamma\varepsilon}\|$  – представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею проєкція двічі контраваріантного метричного тензора  $G$  в цій же СК.

По аналогії з (6) справедливим є правило:

$$E_{\gamma\varepsilon} = [G_{\gamma\varepsilon}]^{-1}. \quad (8)$$

Проєкції тензорів у різних системах координат пов'язані між собою лінійними законами перетворення [27]. Тоді перетворення координат проєкції коваріантного тензора  $T$  при зміні СК здійснюється наступним чином:

$$T_v = A_{\gamma\epsilon}^v T_{\gamma\epsilon}, \quad (9)$$

де  $A_{\gamma\epsilon}^v$  –  $n \times n$ -матриця коваріантного перетворення.

Вектор  $T_{\gamma\epsilon}$  має наступну структуру [21-26]:

$$T_{\gamma\epsilon} = \begin{bmatrix} T_\gamma \\ \dots \\ T_\epsilon \end{bmatrix}; \quad T_\gamma = \begin{bmatrix} \tau_1^\gamma \\ \vdots \\ \tau_j^\gamma \\ \vdots \\ \tau_k^\gamma \end{bmatrix}; \quad T_\epsilon = \begin{bmatrix} \tau_1^\epsilon \\ \vdots \\ \tau_p^\epsilon \\ \vdots \\ \tau_9^\epsilon \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де  $T_\gamma$  –  $k$ -вимірний вектор середніх затримок пакетів уздовж базисних міжполюсних шляхів мережі;  $T_\epsilon$  –  $9$ -вимірний вектор середніх затримок пакетів між вузлами, які утворюють внутрішні вузлові пари;  $\tau_j^\gamma$  – середня затримка пакетів уздовж  $j$ -го базисного міжполюсного шляху ( $\gamma_j$ );  $\tau_p^\epsilon$  – середня затримка пакетів між вузлами, які утворюють  $p$ -ту внутрішню вузлову пару ( $\epsilon_p$ ).

Закон контраваріантного координатного перетворення при зміні розглянутих СК описується не-сингулярною  $n \times n$ -матрицею  $C_{\gamma\epsilon}^v$  [21-26]:

$$\Lambda_v = C_{\gamma\epsilon}^v \Lambda_{\gamma\epsilon}, \quad (11)$$

де  $n$ -вимірний вектор  $\Lambda_{\gamma\epsilon}$ , який є проекцією тензора  $\Lambda$  в СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, має таку структуру:

$$\Lambda_{\gamma\epsilon} = \begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ \dots \\ \Lambda_\epsilon \end{bmatrix}; \quad \Lambda_\gamma = \begin{bmatrix} \lambda_\gamma^1 \\ \vdots \\ \lambda_\gamma^j \\ \vdots \\ \lambda_\gamma^k \end{bmatrix}; \quad \Lambda_\epsilon = \begin{bmatrix} \lambda_\epsilon^1 \\ \vdots \\ \lambda_\epsilon^p \\ \vdots \\ \lambda_\epsilon^9 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де  $\Lambda_\gamma$  –  $k$ -вимірний вектор інтенсивностей потоку вздовж базисних міжполюсних шляхів мережі;  $\Lambda_\epsilon$  –  $9$ -вимірний вектор інтенсивностей потоку між вузлами, які утворюють внутрішні вузлові пари;  $\lambda_\gamma^j$  – інтенсивність потоку вздовж  $j$ -го базисного міжполюсного шляху ( $\gamma_j$ );  $\lambda_\epsilon^p(t)$  – інтенсивність потоку, що надходить у мережу і виходить з мережі через вузли, які створюють  $p$ -ту внутрішню вузлову пару ( $\epsilon_p$ ).

Матриці ко- та контраваріантного перетворення координат при зміні зазначених базисів пов'язані між собою умовами ортогональності

$$C_{\gamma\epsilon}^v (A_{\gamma\epsilon}^v)^t = I, \quad (13)$$

де  $I$  – одинична  $n \times n$ -матриця;  $[\cdot]^t$  – операція

транспонування матриці. Правила формування матриць коваріантного та контраваріантного перетворення координат введених тензорів при зміні описаних СК детально описані у роботах [21-25].

Метричні властивості геометричного простору, який введено на структурі ІКМ, у загальному випадку залежать від характеристик мережного трафіка та параметрів інтерфейсів маршрутизаторів. Як приклад розглянемо варіант, коли функціонування інтерфейсів маршрутизаторів ІКМ моделюється системою масового обслуговування (СМО) М/М/1. Тоді середню затримку пакетів в  $i$ -му каналі зв'язку ІКМ, яка є  $i$ -ю координатою вектору  $T_v$ , можна розрахувати за допомогою формули [21-23, 25]:

$$\tau_i = \frac{1}{\phi_i - \lambda_i}, \quad (14)$$

де  $\phi_i$  – пропускна здатність  $i$ -го каналу зв'язку;  $\lambda_i$  – сумарна інтенсивність всіх потоків пакетів, що протікають в  $i$ -му каналі зв'язку ІКМ ( $i = \overline{1, n}$ ).

Узагальнення виразів (14) на всю множину каналів зв'язку та їхнє приведення до векторно-матричного виду (5), дозволяє отримати координати діагональної матриці  $G_v$  [21-23, 25]:

$$g_v^{ii} = \lambda_v^i (\phi_i - \lambda_i), \quad (15)$$

де  $\lambda_v^i$  – інтенсивність саме того потоку пакетів, який розглядається з точки зору побудови тензорної моделі (3), в  $i$ -му каналі зв'язку ІКМ.

**2. Методика розрахунку середньої міжкінцевої затримки пакетів з використанням тензорної моделі ІКМ.** У межах подальшого дослідження варто врахувати, що середня міжкінцева затримка пакетів, які передаються між заданою парою маршрутизаторів за допомогою множини маршрутів  $P$ , розраховується за такою формулою

$$\tau_{MP} = \sum_{p=1}^{|P|} x_p \tau_p, \quad (16)$$

де  $x_p = \lambda_p / \lambda^{(sum)}$  – доля потоку пакетів, які передаються до маршрутизатора-отримувача за допомогою  $p$ -го шляху;  $\lambda^{(sum)}$  – середня інтенсивність потоку пакетів (1/с) на вході ІКМ;  $\lambda_p$  – інтенсивність потоку пакетів (1/с), які передаються до маршрутизатора-отримувача за допомогою  $p$ -го шляху;  $\tau_p$  – середня затримка пакетів, які передаються вздовж  $p$ -го шляху в ІКМ;  $|P|$  – загальна кількість доступних для маршрутизації шляхів між заданою парою маршрутизаторів.

Згідно з виразами (7), (8), (11) можна встановити закон перетворення проекцій двічі коваріантного тензора  $E$  при переході від базису гілок до базису міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар:

$$E_{\gamma\epsilon} = (C_{\gamma\epsilon}^v)^t E_v C_{\gamma\epsilon}^v. \quad (17)$$

Тоді з урахуванням (10) і (12) рівняння (7) можна представити у такій декомпозиційній формі:

$$\begin{bmatrix} T_\gamma \\ \dots \\ T_\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \\ \dots & & \dots \\ E_{\gamma\varepsilon}^{(3)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ \dots \\ \Lambda_\varepsilon \end{bmatrix} \quad (18)$$

при 
$$\begin{bmatrix} E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \\ \dots & & \dots \\ E_{\gamma\varepsilon}^{(3)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(4)} \end{bmatrix} = E_{\gamma\varepsilon},$$

де  $E_{\gamma\varepsilon}^{(1)}$  – квадратна підматриця розміру  $\kappa \times \kappa$ ;  $E_{\gamma\varepsilon}^{(2)}$  – квадратна підматриця розміру  $\vartheta \times \vartheta$ ;  $E_{\gamma\varepsilon}^{(3)}$  – підматриця розміру  $\kappa \times \vartheta$ ;  $E_{\gamma\varepsilon}^{(4)}$  – підматриця розміру  $\vartheta \times \kappa$ . З форми (18) можна отримати вираз

$$T_\gamma = E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma + E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \Lambda_\varepsilon. \quad (19)$$

Зважаючи на те, що прийнятий до розгляду потік пакетів може відбуватися лише через полюси мережі  $S$ , то в (19)  $\Lambda_\varepsilon = 0$ . Тоді для уточнення загальної форми виразу (16) спочатку помножимо ліву та праву частини формули (19) на  $\Lambda_\gamma^t$ , а потім поділимо їх же на  $\lambda^{(sum)}$ . У результаті проведених перетворень стане справедливою наступна рівність

$$\tau_{MP} = \frac{\Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma}{\lambda^{(sum)}}, \quad (20)$$

яка й визначає шукану формулу для розрахунку СМЗП в ІКМ.

При розв'язанні оптимізаційних задач маршрутизації чутливого до затримок трафіка формулу (20) доцільно використовувати, наприклад, як цільову функцію, що мінімізується. З іншого боку, якщо для значень СМЗП зазначаються певні норми (допуски), то вираз (20) може стати частиною QoS-умов:

$$\frac{\Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma}{\lambda^{(sum)}} \leq \tau_{(don)}, \quad (21)$$

де  $\tau_{(don)}$  – максимально допустиме значення СМЗП для обраного потоку пакетів (табл. 2).

До основних переваг виразу (20) і QoS-умов (21) варто віднести врахування основних структурних і функціональних параметрів ІКМ, характеристик трафіка та дисциплін обслуговування пакетів, а також аналітичну форму умов, що дозволяє забезпечити їхнє використання при оптимізації різнорідних процесів управління трафіком: маршрутизації, розподілу та резервування каналних і буферних ресурсів.

**3. Потокова модель маршрутизації в інфокомунікаційній мережі.** Потокова модель маршрутизації в ІКМ, яка підлягала вдосконаленню, описана в роботах [19, 20]. В її межах структура ІКМ описується орієнтованим графом  $\Gamma = (U, W)$ , де

$U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$  – це введена у першому розділі множина вершин (вузлів), що моделюють маршрутизатори мережі, а  $W = \{w_{i,j}, i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$  – множина дуг графа  $\Gamma$ , в якій кожна дуга  $w_{i,j}$  моделює канал зв'язку, що з'єднує  $i$ -й та  $j$ -й маршрутизатори. Позначимо через  $\varphi_{i,j}$  пропускну здатність (1/с) каналу  $w_{i,j}$ . Таким чином, потокова модель маршрутизації використовує не наскрізну нумерацію каналів зв'язку (як у попередніх розділах), а подвійну, тобто за номерами суміжних маршрутизаторів. Кожній гілці  $v_z$  мережі  $S$  можна поставити в однозначну відповідність дугу  $w_{i,j}$  графа  $\Gamma$ .

Варто врахувати, що в ІКМ одночасно циркулює множина потоків пакетів  $K$ . Тоді в процесі розв'язання задач маршрутизації в ІКМ необхідно визначити множину маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$ , кожна з яких кількісно характеризує долю  $k$ -го потоку пакетів, який протікає в каналі  $w_{i,j}$ . Залежно від типу стратегії маршрутизації, яка реалізується в ІКМ, на маршрутні змінні накладаються такі обмеження:

$$x_{i,j}^k \in \{0, 1\} \quad (22)$$

при реалізації одношляхової маршрутизації або

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1 \quad (23)$$

при використанні багатошляхової маршрутизації:

Умови збереження потоку на маршрутизаторах ІКМ мають вигляд [19, 20]:

$$\begin{cases} \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = 1, & k \in K, u_i = s_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = 0, & k \in K, u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = -1, & k \in K, u_i = d_k, \end{cases} \quad (24)$$

де  $s_k$  – маршрутизатор-джерело (відправник),  $d_k$  – маршрутизатор-отримувач пакетів  $k$ -го потоку.

З метою запобігання перевантаження каналів зв'язку ІКМ на маршрутні змінні  $x_{i,j}^k$  накладаються такі обмеження:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k < \varphi_{i,j}, \quad (25)$$

де  $\lambda_k^{(sum)}$  – середня інтенсивність  $k$ -го потоку пакетів (1/с) на вході в ІКМ.

QoS-умови (21) можуть виступати як додаткові обмеження, що накладаються на маршрутні змінні  $x_{i,j}^k$ , оскільки проєкції метричних тензорів  $E$  та  $G$  залежать від значень цих змінних:



$$\lambda_z = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^k \quad \text{та} \quad \lambda_v^z = \lambda_k^z x_{i,j}^k. \quad (26)$$

Вирази (26) визначають інтенсивності агрегованого потоку ( $\lambda_z$ ) та кожного  $k$ -го потоку окремо в одному й тому ж каналі зв'язку ІКМ, який у межах наскрізної нумерації моделюється гілкою  $v_z$ , а при подвійній нумерації – дугою  $w_{i,j}$ .

**4. Порівняльний аналіз рішень задач маршрутизації чутливого до затримок пакетів трафіка в інфокомунікаційній мережі.** З метою оцінки переваг використання виразу (20) для розрахунку СМЗП при розв'язанні задач маршрутизації чутливого до затримок трафіка було проведено дослідження отриманого рішення та його порівняльний аналіз з відомими маршрутними рішеннями. Запропоноване рішення задачі QoS-маршрутизації (model 1) базувалось на результатах розв'язання оптимізаційної задачі з критерієм оптимальності, який пов'язаний з мінімізацією виразу (20) при наявності обмежень (23)-(25).

Друга модель маршрутизації (model 2), яка використовувалась у процесі порівняльного аналізу, базувалась на застосуванні обмежень (23)-(25) та маршрутних метрик у квадратичній цільовій функції, яка підлягала мінімізації,

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^x \left( \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^k \right)^2, \quad (27)$$

де  $h_{i,j}^x = 10^7 / \varphi_{i,j}$  – маршрутна метрика каналу зв'язку  $w_{i,j}$ , аналогічна до метрик протоколів EIGRP та OSPF [17, 18].

Третє рішення (model 3) представлено моделлю маршрутизації потоків пакетів відповідно до вимог концепції Traffic Engineering [19, 20]. В межах цієї моделі використовувався критерій оптимальності

$$\min_{x, \alpha} \alpha, \quad (28)$$

де  $\alpha$  – верхній поріг завантаженості каналів зв'язку ІКМ, який відповідав таким обмеженням

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad (29)$$

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^k \leq \alpha \varphi_{i,j}. \quad (30)$$

У третій моделі обмеженнями також виступали вирази (23) та (24), а обмеження (30) вводилось замість виразу (25).

Вихідними даними для дослідження виступала структура ІКМ, яка представлена на рис. 2. На цьому рисунку у розривах каналів зв'язку вказані їхні пропускні здатності (1/с). Джерелом пакетів виступав перший маршрутизатор, а отримувачем – дев'ятий маршрутизатор.

Робота кожного каналу зв'язку моделювалась СМО М/М/1.

Для введених на рис. 1 систем координат матриця коваріантного координатного перетворення приймала такий вигляд:

$$A_{\gamma\epsilon}^v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

У ході дослідження інтенсивність вхідного потоку змінювалась у діапазоні  $\lambda^{(вим)} = 10 \div 430$  1/с з тією метою, щоб  $\tau_{MP} \leq 150$  мс (табл. 2). Ефективність порівнюваних маршрутних рішень (model 1 ÷ model 3) оцінювалась за показником СМЗП (16).

З точки зору описаної тензорної моделі (1)-(15) структура ІКМ (рис. 2) визначає 9-ти вимірний геометричний простір.

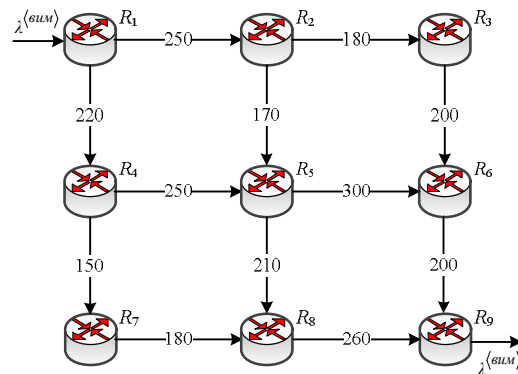


Рис. 2. Приклад структури ІКМ, яка підлягала дослідженню

На рис. 3 показано динаміку зміни СМЗП у залежності від навантаження на мережу ( $\lambda^{(вим)}$ ). При невисокому навантаженні, коли  $\lambda^{(вим)} \leq 300$  1/с, всі три моделі забезпечували значення  $\tau_{MP}$ , яке не перевищувало 50 мс.

З подальшим зростанням навантаження кращу ефективність постійно забезпечувала запропонована у роботі модель (model 1). Як показано на рис. 4, вигреш за СМЗП у порівнянні з моделлю на основі маршрутних метрик (model 2) складав від 3 до 50%, а при критичному навантаженні ( $\lambda^{(вим)} \geq 410$  1/с) – до 100% (крива «вигреш 1-2»). У порівнянні з моделлю маршрутизації на принципах ТЕ (model 3) вигреш за СМЗП складав від 11 до 30% (крива «вигреш 1-3» на рис. 4). Подібний вигреш запропонована модель маршрутизації змогла забезпечити завдяки використанню критерію оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією виразу (20).



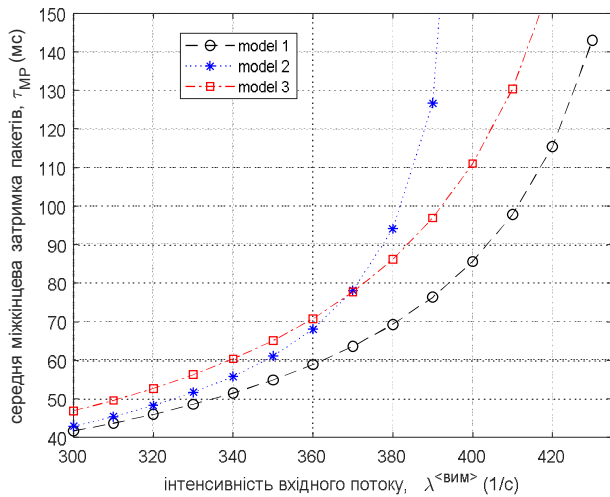


Рис. 3. Динаміка зміни СМЗП у залежності від навантаження на ІКМ

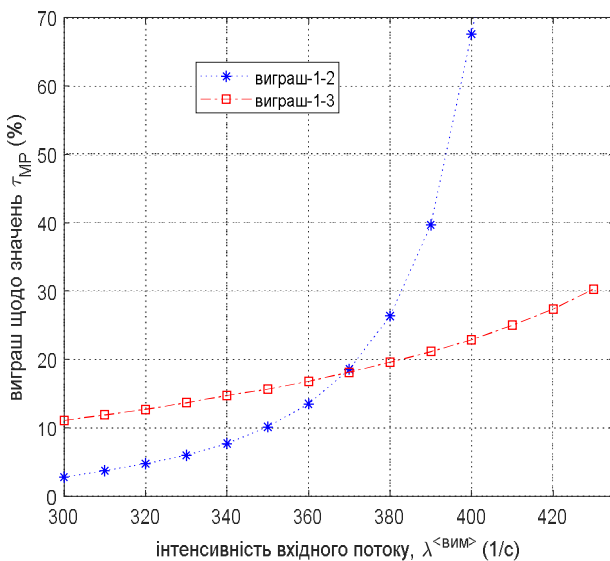


Рис. 4. Виграш за СМЗП від застосування запропонованої моделі маршрутизації в залежності від навантаження на мережу

## Висновки

У роботі вдосконалено оптимізаційну модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в ІКМ, новизною якої є використання критерію оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією середньої міжкінцевої затримки пакетів. Отримати в аналітичному вигляді вираз для розрахунку СМЗП, що є основою зазначеного критерію, вдалось на підставі тензорного моделювання ІКМ (2), коли тензори основних QoS-показників та метричні тензори розглядались у двох системах координат: гілок мережі та незалежних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар.

Крім того, вираз (20) можна використовувати як частину QoS-умов (21), виконання яких дозволяє гарантувати наперед заданий рівень СМЗП для будь-якого виду трафіка в умовах реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації.

У виразі (20), який дозволяє аналітично розрахувати СМЗП, враховуються характеристики мережного трафіка, тип дисципліни обслуговування пакетів на маршрутизаторах ІКМ та пропускні здатності каналів зв'язку. Зміна цих даних не призводить до перегляду форми виразу (20), а лише вплине на значення проєкцій метричних тензорів (17).

Дослідження запропонованої оптимізаційної моделі маршрутизації та порівняльний аналіз з іншими маршрутними рішеннями підтвердили її більш високу ефективність за показником СМЗП, що є важливим для чутливого до затримок трафіка, особливо в умовах високих навантажень на ІКМ. Наприклад, у порівнянні з досить розповсюдженою моделлю маршрутизації, яка реалізована на принципах Traffic Engineering [19, 20], вдалось знизити СМЗП в області середніх і високих навантажень на мережу від 11 до 30%. Умовною платнею за отриманий виграш є ускладнення розрахунків, оскільки при визначенні маршрутних змінних (22), (23) необхідно розв'язувати оптимізаційну задачу нелінійного програмування, тому що використаний критерій оптимальності є нелінійним.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Hanes, D., Salgueiro, G., Grossetete, P., Barton, R., Henry, J.: IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things. Cisco Press (2017)
- Peng, S.-L., Pal, S., Huang, L.: Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm. Springer, Cham (2020)
- Awan, I., Younas, M.: Towards QoS in Internet of Things for Delay Sensitive Information. Trends in Mobile Web Information Systems. 86–94 (2013). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-03737-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03737-0_10)
- 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.
- Gawas, M. A., Gudino, L. J., Anupama, K. R.: Congestion-Adaptive and Delay-Sensitive Multirate Routing Protocol in MANETs: A Cross-Layer Approach. Computer Networks and Communications, 1-13 (2019)
- Javed, U., Suchara, M., He, J., Rexford, J.: Multipath protocol for delay-sensitive traffic. In: 2009 First International Communication Systems and Networks and Workshops, pp. 1-8. IEEE (2009)
- Nasrallah, A., Thyagaturu, A. S., Alharbi, Z., Wang, C., Shao, X., Reisslein, M., & ElBakoury, H.: Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(1), 88-145. IEEE (2018)
- Goel, A., Ramakrishnan, K. G., Kataria, D., Logothetis, D.: Efficient computation of delay-sensitive routes from one source to all destinations. In: IEEE INFOCOM 2001 Conference on computer communications. Twentieth annual joint conference of the IEEE Computer and Communications Society (IEEE INFOCOM 2001), pp. 854-858. IEEE (2001)

9. Bicen, A., Ozan, V., Cagri, G., Ozgur, B. A.: Delay-sensitive and multimedia communication in cognitive radio sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 816-830 (2012)
10. Podlesny, M.: Networking Mechanisms for delay-sensitive applications. Dissertation of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (2009)
11. Khan, F. A., Noor, R. M., Mat Kiah, M. L., Noor, N. M., Altowaijri, S. M., Rahman, A. U.: QoS Enabled Layered Based Clustering for Reactive Flooding in the Internet of Things. *Symmetry*, 11(5), 634, 1-22 (2019) <https://doi.org/10.3390/sym11050634>
12. Yeremenko, O., Lemeshko, O.: QoS Ensuring over Probability of Timely Delivery in Multipath Routing. *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. Vol. 754. 244–254 (2019) [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_25)
13. Вегешна, Ш.: Качество обслуживания в сетях IP. М.: Вильямс (2003)
14. Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O., Shapovalova, A.: Investigation of Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. In: *Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020)*, pp. 1-12 (2020)
15. Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik* (1959)
16. Bellman, R.: On a routing problem. *Quarterly of applied mathematics*. Vol. 16, No. 1. 87-90. (1958)
17. Medhi, D., Ramasamy, K.: *Network Routing, Algorithms, Protocols, and Architectures*. Cambridge, Elsevier (2018)
18. Misra, S., Goswami, S.: *Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies*. Hoboken, Wiley (2017)
19. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
20. Wang, N., Ho, K., Pavlou, G., Howarth, M.: An overview of routing optimization for internet traffic engineering. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 10, No. 1. 36-56 (2008) <https://doi.org/10.1109/COMST.2008.4483669>.
21. Лемешко, А. В., Евсеева, О. Ю.: Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базе межполюсных путей и внутренних разрезов. *Наукові записки УНДІЗ*. Вип. 1(13), 14-26 (2010)
22. Lemeshko, A. V., Evseeva, O. Yu., Garkusha, S. V.: Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greater Number of Indices. *Telecommunications and RadioEngineering*. Vol. 73, No. 15. 1339-1360 (2014) <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30>.
23. Лемешко, А. В., Еременко, А. С.: Динамическое представление тензорной модели многопутевой QoS-маршрутизации в нестационарном режиме работы сетевых интерфейсов. *Проблеми телекомунікацій*. № 1 (18). 3–21 (2016) URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/161\\_lemeshko\\_dynamic.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/161_lemeshko_dynamic.pdf).
24. Lemeshko, O. V., Garkusha, S. V., Yeremenko, O. S., Hailan, A. M.: Policy-based QoS Management Model for Multiservice Networks. In: *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings*, Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, pp. 1–4 (2015)
25. Лемешко, А. В., Евсеева, О. Ю.: Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базе межполюсных путей и внутренних разрезов. *Наукові записки УНДІЗ*. Вип. 1(13). 14-26 (2010)
26. Lemeshko O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Hailan, A.M.: Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network. In: *Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020): The Third International Conference*, pp. 1-12. (2020)
27. Крон, Г.: Тензорный анализ сетей. Москва: Сов. Радио (1978)

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Optimization routing model of delay-sensitive traffic in infocommunication networks

O. Lemeshko, M. Yevdokymenko, O. Yeremenko

**Abstract.** In this work, an improved optimization routing model of delay-sensitive traffic in infocommunication networks is proposed. The novelty of the model is the use of the optimality criterion associated with minimizing the average end-to-end packet delay. This optimality criterion is based on a mathematical expression that allows one to analytically calculate the average end-to-end delay taking into account the characteristics of network traffic, types of packet servicing disciplines on infocommunication network routers, and communication link bandwidths. The conditions for ensuring the Quality of Service in terms of the average end-to-end packet delay for any type of traffic under the conditions of implementing both single path and multipath routing has been obtained. These results were achieved based on tensor modeling of the infocommunication network when tensors of the main QoS indicators and metric tensors were considered in two coordinate systems: network edges, as well as independent interpolator paths and internal node pairs. The study and comparative analysis with other routing solutions confirmed the higher efficiency of the improved model in terms of the average end-to-end packet delay, which is important for delay-sensitive traffic, especially in conditions of high loads on infocommunication networks.

**Keywords:** infocommunication network, packet, traffic, flow, routing, tensor, coordinate system, model, delay, communication link, bandwidth.

В. М. Ліщенко

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

## МЕТОД ОБРОБКИ НЕКОГЕРЕНТНИХ СИГНАЛІВ В МУЛЬТИРАДАРНІЙ СИСТЕМІ ОДНОТИПНИХ ДВОКООРДИНАТНИХ ОГЛЯДОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є метод обробки некогерентних сигналів в мультирадарній системі. **Метою** є підвищення ефективності виявлення повітряних об'єктів за рахунок об'єднання некогерентних сигналів однотипних двокоординатних радіолокаційних станцій в мультирадарній системі. **Завдання:** аналіз тенденцій розвитку повітряних об'єктів, аналіз ефективності виявлення малопомітних повітряних об'єктів, розробка методу обробки некогерентних сигналів в мультирадарній системі оглядових радіолокаційних станцій. Використовуваними **методами** є: методи системного аналізу, теорії ймовірності, математичної статистики, математичний апарат теорії матриць, теорії статистичної радіотехніки, теорії радіолокації. Отримані такі **результати**. Розроблений метод обробки некогерентних сигналів в мультирадарній системі. Встановлено, що при некогерентній обробці сигналів ефективність у вираші у відношенні сигнал/шум дорівнює 11 дБ для мультирадарної системи з чотирьох радіолокаційних станцій у порівнянні з автономною радіолокаційною станцією. **Висновки.** Найбільшу ефективність у вираші у відношенні сигнал/шум показало додавання другої радіолокаційної станції. Встановлено, що оптимальна кількість радіолокаційних станцій у складі мультирадарної системи не більше чотирьох. Подальше збільшення кількості радіолокаційних станцій погіршує практичну значущість та економічну доцільність створення системи.

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, мультирадарна система, повітряний об'єкт, некогерентна обробка, крива виявлення, ймовірність правильного виявлення, ймовірність хибної тривоги.

### Вступ

#### Постановка проблеми у загальному вигляді.

В умовах ведення сучасних гібридних та мережецентричних війн побудова надійної системи протиповітряної оборони (ППО) значно ускладнюється через появу малопомітних (з низьким рівнем радіолокаційного контрасту) та малорозмірних повітряних об'єктів (ПО) [1–3].

З досвіду ведення сучасних локальних збройних конфліктів відомо, що малорозмірні БПЛА в більшості випадків не виявлялися існуючими радіолокаційними станціями (РЛС) [1–4].

У теперішній час розроблюються новітні та модернізуються існуючі зразки РЛС у тому числі з цифровими фазованими антенними решітками, але цей процес є поступовим та коштовним. Тому, в цілому наявна радіолокаційна техніка не забезпечує повністю вирішення завдань виявлення малопомітних ПО. У той же час в наявності велика кількість оглядових двокоординатних РЛС "старого" парку типу П-18. Указані РЛС не спроможні виявляти сучасні малопомітних ПО з заданими показниками якості [2]. Таким чином, у теперішній час при вирішенні задач виявлення малопомітних ПО загострилася невідповідність між тенденціями розвитку ПО та можливостями існуючих РЛС щодо виявлення малопомітних ПО з необхідною ефективністю.

Для вирішення указаної невідповідності запропоновано об'єднати існуючі оглядові двокоординатні РЛС в мультирадарні системи (МРС) з сумісною обробкою сигналів [5–9].

**Мета статті** – підвищення ефективності виявлення ПО за рахунок об'єднання некогерентних сигналів однотипних двокоординатних РЛС в МРС.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день задачі пошуку та виявлення ма-

лопомітних ПО вирішуються шляхом ведення спостереження, використанням, радіотехнічних, інфрачервоних, оптичних та акустичних засобів спостереження. Проте застосування радіолокаційних засобів спостереження має свої беззаперечні переваги перед вищезазначеними способами [5–10]. В останні роки ведуться розробки та широко застосовуються нетрадиційні методи: використання сторонніх джерел підсвіту, з використанням ефекту "радіолокації на просвіт", застосуванням пасивно-активних радіолокаційних комплексів та інші [5–10].

Перераховані методи засновані на загальній сучасній тенденції у розвитку радіолокаційної техніки – об'єднанні окремих пристроїв (засобів) у системи. Відомо, що існує цілий ряд різних типів мультирадарних систем. Окремі позиції елементів таких систем просторово рознесені одна від одної, при цьому обробка радіолокаційної інформації (РЛІ) проводиться в центральному пункті обробки, який може бути суміщений з однією з позицій або розташований окремо. В такому пункті доцільно проводити сумісну обробку радіолокаційної інформації, ефективність якої залежить від ступеню когерентності, яка забезпечується в системі [6, 9]. В роботі [5] запропоновано об'єднати існуючі оглядові двокоординатні РЛС у синхронну МРС з сумісною обробкою. Метод формування узгодженої зони огляду малобазової МРС однотипних оглядових РЛС з механічним обертанням наведено на рис. 1 [5].

### Основна частина

Створення МРС дає можливість вирішити завдання збільшення енергетичного потенціалу РЛС, збільшення коефіцієнту підсилення антенних систем або використання системних ефектів. Використання системних ефектів при об'єднанні автономних РЛС в МРС пов'язано з можливостями реалізації різного

ступеню когерентності просторово рознесених позицій та сумісним прийомом ехосигналів [5, 6, 8].

Кожна РЛС випромінює свій зондувальний сигнал (ЗС), який не корельований із ЗС інших РЛС. Сигнали усіх РЛС випромінюються одночасно. Не корельованість (ортогональність) може забезпечуватися за рахунок [9, 10]:

- рознесення по частоті (частотна);
- кодування сигналів (кодова).

Кожна РЛС приймає ехо сигнали:

- свій ЗС, відбитий від ПО;
- відбитий від ПО ЗС сусідніх РЛС.

В залежності від побудови системи синхронізації МРС, сигнали, що випромінюються РЛС можуть бути взаємно когерентними або некогерентними. Отже може утворюватися МРС з взаємно когерентними або взаємно некогерентними сигналами.

Розглянемо МРС при використанні ортогональних взаємно некогерентних ЗС. Їх обробка в приймальних системах просторово-рознесених РЛС обумовлюється наступними особливостями:

- ступенем когерентності приймальних систем просторово-рознесених РЛС;
- ступенем взаємної просторової кореляції ехо-сигналів від ПО на входах приймачів просторово-рознесених РЛС.

Розглянемо випадок, коли кожна РЛС зі складу МРС, має можливість примати та обробляти усі сигнали, що випромінюються в МРС. При випромінюванні в МРС взаємно некогерентних ЗС, але забезпеченні взаємної когерентності приймальних систем РЛС (за рахунок відповідної синхронізації гетеродинів приймальних систем) та взаємної просторової кореляції флуктуації ехо-сигналів від ПО (за рахунок зменшення відстані між РЛС) оптимальний по критерію Неймана-Пірсона алгоритм виявлення має вигляд, з аналізу якого визнається послідовність дій (рис. 2):

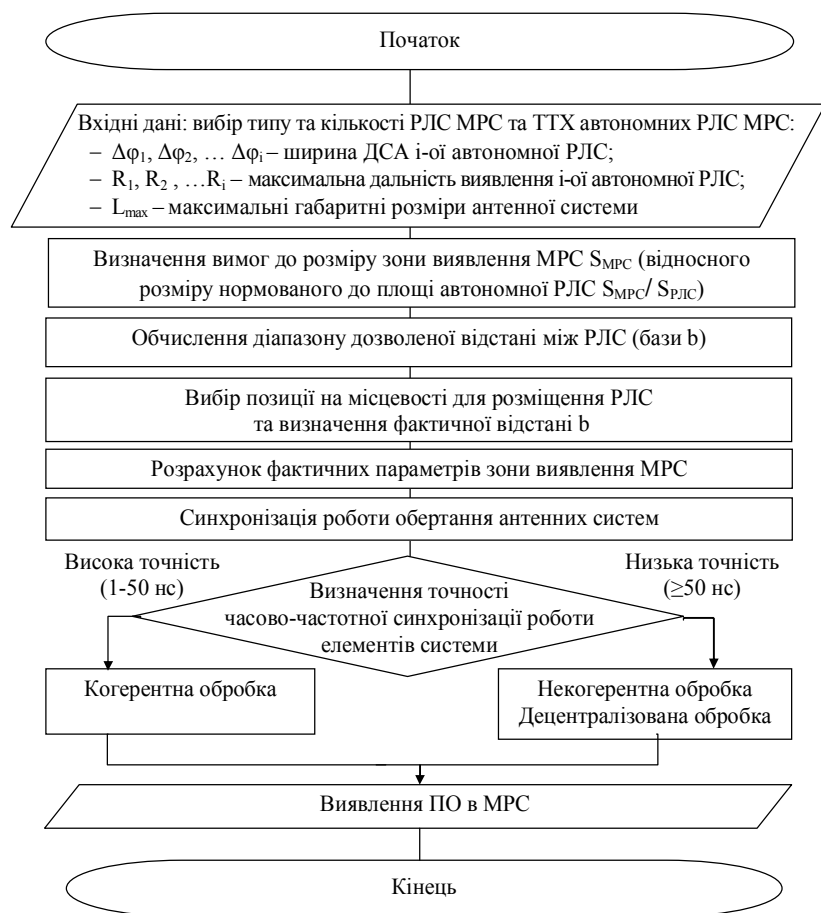


Рис. 1. Метод формування узгодженої зони огляду малобазової МРС однотипних оглядових РЛС з механічним обертанням



Рис. 2. Метод обробки некогерентних сигналів в МРС

$$L = \sum_{i=1}^M \left| \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{npj}) \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) x_j(t) dt \right|^2 > h, \quad (1)$$

де  $\tau_{npj}$  – врахування часу запізнення ЗС, що випромінюється  $i$ -ою РЛС, в приймальному пристрої  $j$ -ої РЛС;  $S_{i0}^*(t-t_0)$  – імпульсна характеристика УФ сигналу, що випромінюється  $i$ -ою РЛС;  $x_j(t)$  – сигнал, що приймається в приймальному пристрої  $j$ -ої РЛС;  $N$  – кількість РЛС, що випромінюють ортогональні сигнали;  $M$  – кількість РЛС, що приймають ехо-сигнали. Проведемо аналіз ефективності методу зображеного на рис. 2. Вихідна статистика за відсутності сигналу визначається виразом (2):

$$L_0 = \sum_{i=1}^M \left| \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{npj}) \times \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) n_j(t) dt \right|^2 = \sum_{i=1}^M |Z_{0i}|^2, \quad (2)$$

$$\text{де } Z_{0i} = \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{npj}) \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) n_j(t) dt; \quad (3)$$

$n_j(t)$  – шумовий процес в  $j$ -ої РЛС.

Статистика  $Z_{0i}$  є гаусовою випадковою величиною з нульовим середнім, а дисперсія статистики (3) визначається виразом (4):

$$\frac{1}{2} \overline{Z_{0i}^* Z_{0i}} = \sum_{j=1}^N N_0 \int_{-\infty}^{\infty} |S_{i0}^*(t)|^2 dt = 2N_0 N \tau_i; \quad (4)$$

$$h_0 = F^{-1} \left( \frac{p}{v} \right) = \left\{ h_0 : F \left( \frac{h_0}{v} \right) = p \right\}, \quad (5)$$

де  $h_0$  – значення порогу для імовірності хибної тривоги  $P_{xm}$ ;  $v=2M$  – кількість ступенів свободи;

$$p = (1 - P_{xm}) = F \left( \frac{h_0}{v} \right) = \int_0^{\frac{h_0}{v}} \frac{t^{(v-2)/2} e^{-t/2}}{2^{v/2} \Gamma(v/2)} dt; \quad (6)$$

$\Gamma(\cdot)$  – Гамма функція.

Враховуючі ортогональність сигналів та незалежність випадкових флуктуацій амплітуд сигналів та власних шумів приймальних каналів середнє значення відношення сигнал/шум на вході детектора з урахуванням (4) має вигляд наведений у виразі (7):

$$\frac{1}{2} \overline{\frac{Z_{lic}^* Z_{lic}}{Z_o^* Z_o}} = \frac{2 \overline{E_c} N^2 \tau_i}{2 N_0 \tau_i N} = \frac{\overline{N E_c}}{N_0} = \overline{N q_c^2}, \quad (7)$$

де  $\overline{q_{неког}^2}$  – середнє відношення сигнал/шум на вході детектора для сигналу одного типу;  $\overline{E_c}$  – середня енергія одного сигналу на вході приймальної систе-

ми кожної РЛС;  $\overline{q_c^2}$  – середнє відношення сигнал/шум по сигналу одного типу на виході однієї РЛС.

Із аналізу виразу (7) видно, що когерентне підсумовування сигналів одного типу на виходах РЛС при некогерентному підсумовуванні шумів забезпечує збільшення відношення сигнал/шум на вході детекторів в  $N$  разів відносно відношення сигнал/шум на виході кожної РЛС.

Для випадку, коли середнє відношення сигнал/шум однакові для всіх  $M$  сигналів, залежність імовірності правильного виявлення визначається виразом:

$$P_g \approx \left( 1 + \frac{1}{M \overline{q_{неког}^2}} \right)^{M-1} \exp \left[ -\frac{h_0 / 2}{1 + M \overline{q_{неког}^2}} \right], \quad (8)$$

де  $h_0$  – нормований поріг, що визначається заданим рівнем хибної тривоги згідно виразу (5);  $M$  – кількість сигналів, що підсумовуються некогерентно.

Характеристики виявлення для однієї РЛС та малобазової МРС, яка реалізує метод виявлення згідно алгоритму (1) для випадку коли кожна РЛС приймає некогерентні сигнали усіх РЛС із МРС при імовірності хибної тривоги  $P_{XT}=10^{-6}$  наведені на рис. 3.

На рис. 4 наведено залежність виграшу  $K(m)$  у потрібному відношенні сигнал/шум в кожній з  $m$  РЛС зі складу МРС відносно автономної РЛС для забезпечення показників якості виявлення ПО в МРС ( $P_B = 0,5, P_{XT} = 10^{-6}$ ) при некогерентному об'єднанні РЛС від кількості РЛС ( $m$ ), що об'єднуються.

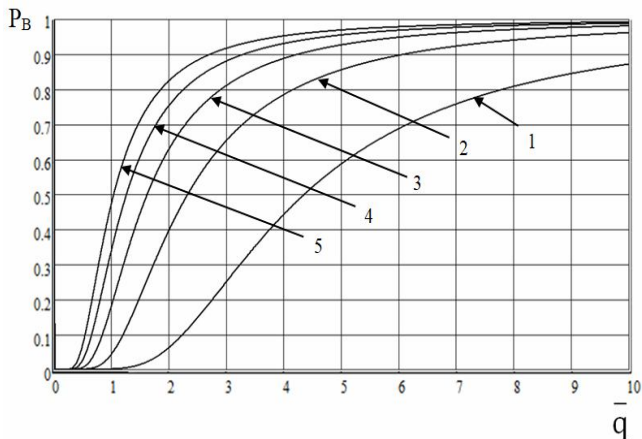


Рис. 3. Характеристики виявлення некогерентної МРС, яка реалізує метод (рис. 2), при імовірності хибної тривоги  $P_{XT}=10^{-6}$ : 1 – для автономної РЛС; 2 – при використанні 2-х РЛС в МРС; 3 – при використанні 3-х РЛС в МРС; 4 – при використанні 4-х РЛС в МРС; 5 – при використанні 5-х РЛС в МРС

Із аналізу залежності виграшу у відношенні сигнал/шум, наведеної на рис. 4 видно, що об'єднання двох РЛС у просторово-некогерентну МРС, яка реалізує метод згідно рис. 2, по відношенню до автономної РЛС забезпечує виграш біля 5,5 дБ. Додавання третьої РЛС забезпечує збільшення виграшу лише на 3 дБ.



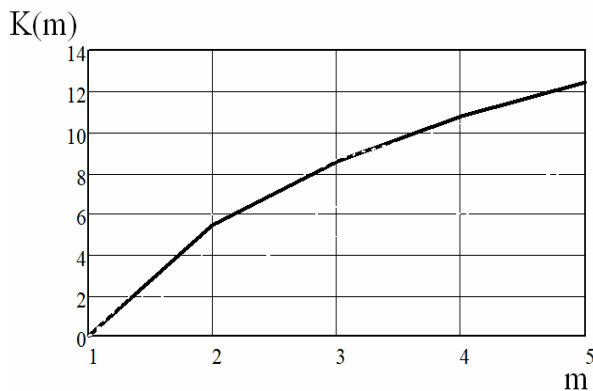


Рис. 4. Залежність виграшу у відношенні сигнал/шум в просторово-некогерентній МРС ( $P_B=0.5$ ,  $P_{\text{ЛТ}}=10^{-6}$ )

Подальше збільшення кількості РЛС, що об'єднуються, приводить до збільшення виграшу не більше ніж на 2 дБ на кожен доданий РЛС з тенденцією до зниження цього показника з кожним наступним кроком. Тому, за критерієм ефективність-вартість найбільший ефект виявляється при об'єднанні двох-трьох РЛС.

Об'єднання чотирьох і більше РЛС також забезпечують зростання виграшу, але швидкість цього зростання значно менша, що погіршує практичну значущість та економічну доцільність.

### Висновки

Встановлено, що при некогерентній обробці сигналів ефективність у виграші у відношенні сигнал/шум для малобазової МРС дорівнює 11 дБ для МРС з чотирьох РЛС у порівнянні з автономною РЛС.

Найбільшу ефективність у виграш показало додавання другої РЛС.

Встановлено, що оптимальна кількість РЛС у складі МРС не більше чотирьох. Подальше збільшення кількості РЛС погіршує практичну значущість та економічну доцільність.

**Напрямок подальших досліджень:** порівняння виграшу у підвищенні відношення сигнал/шум при об'єднанні сигналів в когерентній та некогерентній МРС при різних методах обробки сигналів у порівнянні з виявленням ПО в автономних РЛС не об'єднаних в систему.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Алімпієв А.М., Певцов Г.В. Особливості гібридної війни РФ проти України. Досвід, що отриманий Повітряними Силами Збройних Сил України. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2017 № 2(27). С. 19–25
- Белавін О.В., Климченко В.Й., Камалтинов Г.Г., Маляренко О.С. Світові тенденції розвитку радіолокаційних засобів контролю повітряного простору. *Наука і оборона*. 2015. № 1. С. 48–53.
- Довідник учасника АТО: озброєння і військова техніка Збройних Сил Російської Федерації: Алімпієв А.М., Певцов Г.В., Гриб Д.А. (ред.). Х.: Оригінал, 2015. 732 с.
- Ліщенко В.М., Чалий В.В., Карлов А.Д. Малорозмірні безпілотні літальні апарати як об'єкти радіолокаційної розвідки. Системи управління, навігації та зв'язку. 2016. № 3(39) С. 27–32.
- Худов Г.В., Ліщенко В.М., Тютюнник В.О., Чалий В.В. Мультирадарна система оглядових радіолокаційних станцій з малою базою. Системи озброєння і військова техніка. 2017. № 4(52). С. 123–128.
- Khudov N. Method for the detection of small sized air objects by observational radars / N. Khudov, A. Zvonko, S. Kovalevskiy, V. Lishchenko, F. Zots // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – № 2/9 (92). – P. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126509>.
- Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
- Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // *Системи обробки інформації*, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.
- Chernyak V.S. *Fundamentals of Multisite Radar Systems*. Gordon and Breach Science Publishers. 1998. 475 p.
- Radar Handbook. Third Edition / Editor in Chief Merrill I. Skolnik. USA: McGraw-Hill, 2008. 1351 p.

Received (Надійшла) 23.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### The method of noncoherent signals processing in multiradar system of single-type two-coordinate survey radars with mechanical rotation

V. Lishchenko

**Abstract.** The subject matter of the article is the method of processing incoherent signals in a multi-radar system. The goal is to increase the detection efficiency of aerial objects by combining incoherent signals of the same two-coordinate radars in a multi-radar system. Objectives: analysis of trends in the development of airborne objects, analysis of the effectiveness of detection of unobtrusive air objects, development of a method of processing incoherent signals in a multi-radar system of radar observation stations. The methods used are: systems analysis methods, probability theory, mathematical statistics, mathematical apparatus of matrix theory, statistical radio engineering theory, radar theory. The following results were obtained. The method of processing incoherent signals in multiradar system is developed. In incoherent signal processing, the gain-to-signal gain for low-mass spatial-incoherent MRS is found to be 11 dB for MRS of four radars compared to autonomous radar. **Conclusions.** The highest efficiency in signal / noise gain was shown by the addition of a second radar. It is established that the optimal number of radars in the MRS is not more than four. Further increase in the number of radars impairs the practical importance and economic feasibility of creating a system.

**Keywords:** radar, multi radar system, air object, noncoherent processing, detection curve, probability of correct detection, probability of false alarm.

Л. М. Сакович, Г. Я. Криховецький, І. М. Гиренко, Ю. В. Мирошніченко

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Київ, Україна.

## МЕТОД РОЗРОБКИ АЛГОРИТМІВ ДІАГНОСТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОМПЛЕКСІВ

**Анотація.** У статті розглядається можливість використання комплексного показника, що враховує надійність, часові та вартісні показники перевірки окремих підсистем об'єкту великої розмірності для побудови алгоритму його діагностування. Це дозволяє скоротити середній час відновлення комплексу за рахунок першочергової перевірки стану найменш надійних підсистем, які потребують мінімальних працевитрат та вартості на перевірку і відновлення. Також приведено блок-схему реалізації методу, що дозволяє використовувати ЕОМ для автоматизації процесу розробки діагностичного забезпечення перспективних зразків засобів і комплексів спеціального зв'язку. Наведений приклад використання методу та кількісна оцінка ефективності його застосування. Отримані результати в подальшому дозволяють скоротити час і працевитрати на відновлення при поточному ремонті перспективних зразків і комплексів спеціального зв'язку.

**Ключові слова:** радіоелектронні комплекси, засоби спеціального зв'язку, алгоритм діагностування, ймовірність переважного вибору.

### Вступ

Технічна діагностика, як наука, досліджує практично реалізовані методи і методики скорочення часу і вартості локалізації дефектів, підвищення ймовірності знаходження їх місця в несправному об'єкті, але середній час діагностування при поточному ремонті радіоелектронних комплексів (РЕК) складає до 80% часу відновлення їх працездатності [1-7]. Тому завдання підвищення ефективності технічного діагностування засобів спеціального зв'язку завжди є актуальним.

Відомі методи розробки алгоритмів технічного діагностування об'єктів відрізняються і залежать від інформації про його складові частини [1-3]: при наявності тільки структурної схеми об'єкту, доцільно використовувати метод половинного ділення (діхотомію); якщо відомі інтенсивності відмов елементів і час виконання перевірок, то умовний алгоритм діагностування (УАД) виробу розробляють з використанням ймовірності переважного вибору (ЙПВ) перевірок, що значно скорочує середній час пошуку дефектів. Але ці методи не враховують можливість відмови засобів вимірювань (ЗВ), тобто їх метрологічну надійність [4, 7], а також вартість перевірок. Цю обставину враховує комплексний коефіцієнт, який використовують для визначення порядку перевірки РЕК при їх технічному обслуговуванні за станом [8].

**Мета статті** – отримання послідовності перевірок підсистем РЕК для мінімізації часу постановки діагнозу за рахунок першочергової перевірки стану найменш надійних підсистем, які потребують найменших працевитрат і вартості на перевірку та відновлення у вигляді УАД при обмеженнях, що відповідають ремонту РЕК в польових умовах (на склад ЗВ, кількість і кваліфікацію екіпажу).

### Математична постановка завдання

Для математичного опису завдання потрібно сформулювати цільову функцію досліджень. Для

цього необхідно виявити параметр, який треба оптимізувати (в даному випадку це мінімум середнього часу відновлення  $T_e$ ), а також аргументи, що впливають на його значення. При цьому важливо встановити керовані, які можна змінювати, та некеровані змінні. В даному випадку до керованих змінних відноситимуться послідовність і кількість перевірок РЕК за УАД, час їх виконання (залежить від кваліфікації фахівців і ЗВ, що використовують для виконання перевірок). Це також впливає на вартість ремонту в цілому. До некерованих змінних відносяться число підсистем ( $M$ ) РЕК і елементів в них ( $L_i, i = \overline{1, M}$ ), їх надійність ( $z_i$ ), поділ РЕК на конструктивні елементи (підсистеми, блоки, модулі), метрологічні характеристики ЗВ.

До цільової функції висувається ряд вимог [9]: однозначність (наявність екстремуму); відповідність реальному процесу; запис через параметри керування; розробка для головного показника системи; відсутність розривів. При цьому частина аргументів виноситься у вигляді обмежень (ймовірність встановлення дефекту за необхідний час, вартість ЗВ не більш припустимого значення). Таким чином, систему ремонту РЕК можливо описати цільовою функцією у вигляді мінімізації середнього часу відновлення при обмеженнях, що відповідають польовим умовам роботи ремонтних органів:

$$T_e(x) = \min T_e(x^*); x^* \in \Delta,$$

де  $x$  – параметри системи ремонту;  $x^*$  – їх значення при рішенні завдання;  $\Delta$  – область припустимих значень зміни параметрів.

Математична постановка завдання у вигляді цільової функції дозволяє кількісно оцінити ефект від її рішення в якості показника, що виражається у відносних одиницях (відсотках). В такому разі показник ефективності методу розробки алгоритмів діагностування РЕК характеризує відносне зменшення середнього часу відновлення з використанням алгоритму ( $T_e$ ) по відношенню до відомих ( $T_e'$ ) [8]:



$$\eta = \left( T_e' - T_e \right) / T_e' \cdot 100\% .$$

### Структура рішення задачі розробки методу побудови алгоритмів діагностування радіоелектронних комплексів

Метод призначений для розробки УАД РЕК. Його сутність полягає в комплексному обліку показників надійності, вартості і часу перевірки стану елементів (підсистем) об'єкту. Необхідні для реалізації вихідні дані отримують з технічної документації РЕК і результатів дослідної експлуатації: відомості про склад об'єкту; показники надійності окремих підсистем; відомості про ЗВ (вартість, метрологічні характеристики); дані про часові і вартісні показники перевірок підсистем РЕК. Обмеження на використання методу: можливість поділу РЕК на окремі підсистеми; можли-

вість автономної перевірки працездатності окремих підсистем РЕК; реалізація ремонту агрегатним методом; вибір ЗВ зі списку дозволених; відновлення працездатності фахівцями штатного екіпажу.

Припущення при використанні методу: врахування метрологічної надійності ЗВ; комплект ЗВ дозволяє перевірку усіх підсистем і залишається незмінним; кваліфікація фахівців відповідає посаді.

Перераховані обмеження і припущення відповідають умовам поточного ремонту РЕК у військових мобільних апаратних технічного забезпечення. Метод дозволяє обґрунтувати послідовність виконання перевірок РЕК під час діагностування в процесі поточного ремонту штатними екіпажами або із залученням фахівців апаратних технічного забезпечення в польових умовах. Схема реалізації методу приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема реалізації методу розробки алгоритмів діагностування радіоелектронних комплексів

#### Математичний апарат реалізації методу

Розробка УАД РЕК великої розмірності заснована на використанні методів теорії ймовірностей, теорії графів і теорії надійності технічних систем [1-9]. Відносну надійність кожної підсистеми РЕК розраховують за формулою, що характеризує ймовірність відмови підсистеми при відмові виробу

$$p_i = z_i / \sum_{j=1}^M z_j = z_i T ; \quad \sum_{i=1}^M p_i = 1 ;$$

де  $z_i$  – параметр потоку відмов підсистем;  $T$  – напрацювання РЕК на відмову.

Якщо підсистеми РЕК виконані на однотипній елементній базі, то можливо використовувати вираз:

$$p_i = \frac{L_i}{L} ; \quad L = \sum_{i=1}^M L_i ;$$

де  $L$  – загальна кількість елементів РЕК.

Відносна трудоемність перевірок стану підсистем РЕК дорівнює:

$$\tau_i = t_i / \sum_{j=1}^M t_j ; \quad \sum_{i=1}^M \tau_i = 1 ;$$

де  $t_i$  – трудоемність (час) перевірки параметрів підсистеми  $i$  з врахуванням ймовірності правильної оцінки її результату.

Відносна вартість ЗВ для перевірки параметрів підсистеми  $i$  дорівнює:

$$s_i = C_i / \sum_{j=1}^M C_j ; \quad \sum_{i=1}^M s_i = 1 ;$$

де  $C_i$  – вартість ЗВ для перевірки працездатності підсистеми  $i$ . Відносний час відновлення (заміни або резервування) підсистеми  $i$

$$f_i = t_{ei} / \sum_{j=1}^M t_{ej} ; \quad \sum_{i=1}^M f_i = 1 ;$$

де  $t_{ei}$  – час відновлення підсистеми  $i$ . Для визначення послідовності перевірки підсистем РЕК під час діагностування пропонується кожну підсистему оцінити комплексним показником, що враховує всі розглянуті складові

$$u_i = \frac{p_i P_{zi}}{\tau_i s_i f_i} ; \quad P_{zi} = \prod_{j=1}^{m_i} P_{mj} ;$$

де  $P_{zi}$  – метрологічна надійність ЗВ, що використовують для перевірки підсистеми  $i$ ;  $m_i$  – кількість ЗВ для перевірки підсистеми  $i$ ;  $P_{mj}$  – метрологічна надійність окремих ЗВ для перевірки підсистеми  $i$ . Отримане значення  $u_i$  безрозмірне і суттєво відрізняється для окремих підсистем РЕК, тому доцільно використовувати ЙПВ підсистем

$$U_i = u_i / \sum_{j=1}^M u_j; \quad \sum_{i=1}^M U_i = 1.$$

В подальшому з використанням отриманих значень ЙПВ підсистем виконують побудову алгоритму діагностування РЕК у вигляді ДЛМ [1-7].

**Блок-схема реалізації метода побудови алгоритму діагностування**

Реалізація метода формалізована у вигляді блок-схеми, яка наведена на рис. 2. Після отримання вихідних даних окремих підсистем РЕК (2) за відомими методиками [1-7] виконують побудову діагностичної моделі об'єкта у вигляді графа інформаційно-енергетичних зв'язків (ГЕЗ) (3).

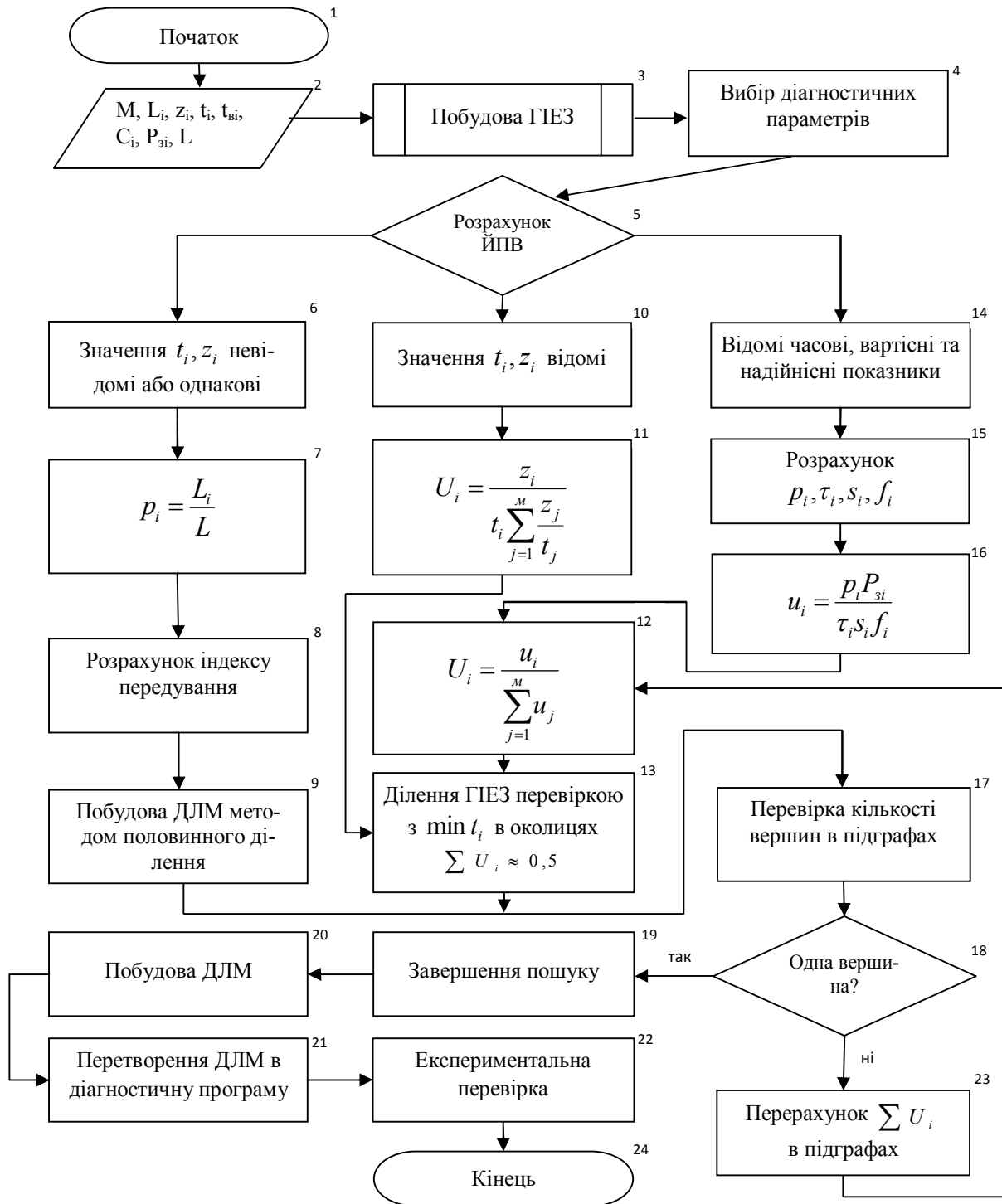


Рис. 2. Блок-схема реалізації метода діагностування радіоелектронних комплексів

При цьому зворотні зв'язки і транзитивні зв'язки розривають. Потім для кожної підсистеми обирають діагностичні параметри (4): переважно вимірювання напруги або опору, а також аналіз форми сигналу за допомогою осцилографа. При поточному ремонті доцільно використовувати можливості вбудованих засобів діагностування.

В подальшому, залежно від обсягу інформації про об'єкт, розрахувати значення ЙПВ (5). При наявності тільки структурної схеми виробу виконують розрахунок індексів передування [1-7] і побудову ДЛМ методом половинного ділення (6-9). При відомих значеннях параметру відмов  $z_i$  і часу перевірки підсистем  $t_i$  розрахунок ЙПВ за рекомендаціями [1-7] (10, 11) з побудовою ДЛМ мінімальної форми за критерієм мінімуму  $T_e$  (13). Якщо відомі часові, вартісні та надійнісні показники підсистем РЕК, то розрахунок комплексного показника (14-16) і ЙПВ (12) кожної підсистеми виробу. В подальшому ділення ПЕЗ перевіркою з мінімальним значенням  $t_i$  в околицях суми  $U_i$  приблизно рівною 0,5 (13). Якщо перевірка кількості вершин в підграфах (17) показує, що вона більше одиниці (18), то виконують перерахунок суми ЙПВ в них (23) і процес продовжується (17). Якщо після виконання чергової перевірки залишається одна вершина (18), то пошук завершується (19) і після побудови ДЛМ (20) з подальшим перетворенням в діагностичну програму (вказівки про місце перевірки, ЗВ, можливі результати її виконання) (21) виконують експериментальну перевірку отриманої діагностичної програми (22).

**Приклад використання запропонованого методу**

Порядок використання методу розглянемо на прикладі РЕК з [8], схема якого наведена на рис. 3.

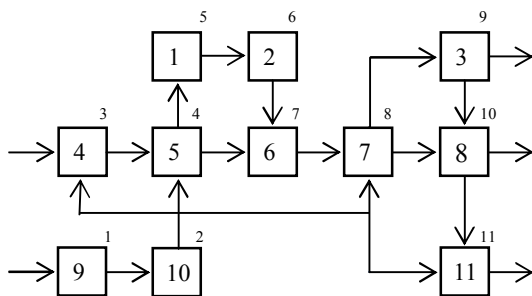


Рис. 3. Схема з'єднання підсистем радіоелектронного комплексу

Вихідні дані і результати проміжних розрахунків приведено в табл. 1 [8]. РЕК складається зі  $M = 11$  підсистем. Необхідно побудувати УАД, що мінімізує середній час відновлення РЕК при поточному ремонті. Результати розрахунку комплексних показників, ЙПВ і рангу ( $R_i$ ) підсистем РЕК приведено в табл. 2 [8]. Ранг підсистем відображає порядок їх перевірки при обслуговуванні РЕК за станом.

Розглянемо можливі варіанти побудови УАД об'єкту. На рис. 3 відображено індекси передування підсистем, тобто кількість підсистем, що впливають на роботу даної плюс одиниця. При відсутності відомостей про надійність, часові та вартісні показ-

ники перевірок побудову УАД виконують методом діхотомії (половинного ділення об'єкту перевірки) з використанням індексу передування. Отриманий таким чином УАД приведено на рис. 4.

Таблиця 1 – Приклад розрахунку показників підсистем радіоелектронного комплексу

$i$	$z_i$	$t_i$	$C_i$	$t_{ei}$	$p_{si}$	$p_i$	$\tau_i$	$s_i$	$f_i$
1	4	15	2500	10	0,85	0,04	0,054	0,123	0,055
2	4	15	2000	12	0,88	0,04	0,065	0,098	0,066
3	10	20	1000	15	0,81	0,10	0,082	0,049	0,083
4	10	20	1200	20	0,79	0,10	0,108	0,059	0,110
5	6	10	1800	11	0,91	0,06	0,059	0,089	0,061
6	7	10	2100	8	0,88	0,07	0,043	0,103	0,044
7	6	10	1200	16	0,93	0,06	0,086	0,059	0,088
8	25	30	1500	25	0,95	0,25	0,145	0,074	0,138
9	4	15	3500	22	0,89	0,04	0,119	0,172	0,121
10	4	15	3000	18	0,87	0,04	0,097	0,148	0,099
11	20	25	500	24	0,88	0,20	0,142	0,026	0,135

Таблиця 2 – Приклад розрахунку показників підсистем радіоелектронного комплексу

$i$	$u_i$	$U_i$	$R_i$
1	93,1	0,0549	8
2	83,7	0,0493	9
3	242,9	0,1432	3
4	112,7	0,0664	7
5	170,4	0,1005	4
6	316,1	0,1863	2
7	125,0	0,0737	6
8	160,4	0,0946	5
9	14,4	0,0085	11
10	24,5	0,0144	10
11	353,1	0,2082	1

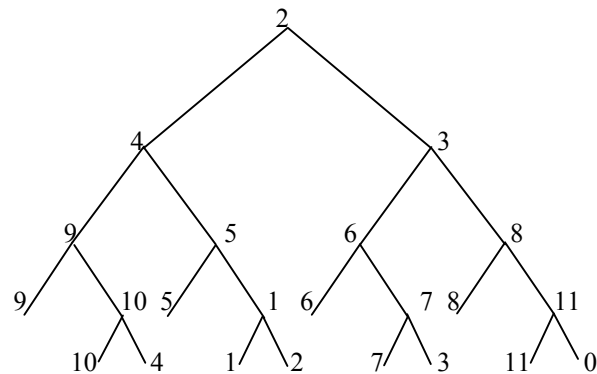


Рис. 4. Умовний алгоритм діагностування об'єкту методом половинного ділення

В такому разі середній час відновлення РЕК дорівнює (з врахуванням справного стану виробу):

$$T_e' = \sum_{i=1}^{M+1} \left( t_{ei} + \sum_{j=1}^{K_i} t_j \right) / (M+1) = \frac{927}{12} = 77,25 \text{ хв.}$$

Якщо використовувати відомі рекомендації щодо розрахунку ЙПВ і побудови УАД при наявності даних про надійність підсистем і час виконання їх перевірки [1-5] отримуємо алгоритм виду рис. 5.

У цьому випадку отримуємо

$$T_e'' = 912/12 = 76 \text{ хв.,}$$

що краще, ніж раніше на 1,6%.

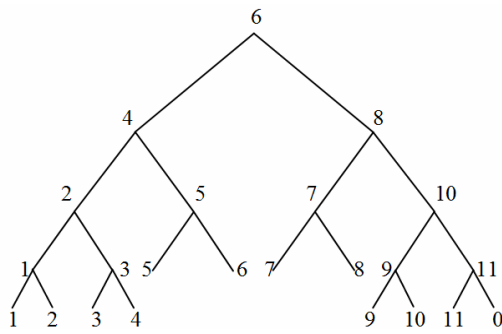


Рис. 5. Умовний алгоритм діагностування, побудований за відомими рекомендаціями

При використанні запропонованого методу отримуємо УАД виду рис. 6, при цьому

$$T_6 = 842/12 = 70,2 \text{ хв.},$$

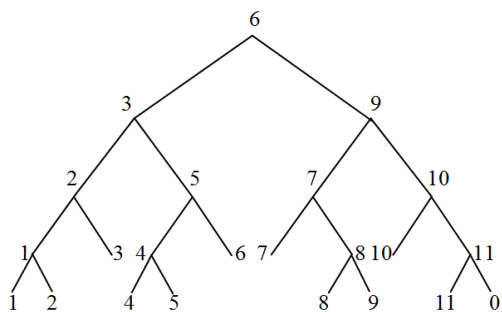


Рис. 6. Алгоритм діагностування, побудований запропонованим методом

що на 7,6% краще, ніж в попередньому випадку, або на 9,1% менше часу відновлення з побудовою УАД методом половинного ділення. В цих випадках середня кількість перевірок при пошуку дефекту дорівнює

$$K = \sum_{i=1}^{M+1} K_i / (M+1) = 3,76.$$

### Висновки

Запропоновано метод розробки умовних алгоритмів діагностування радіоелектронних комплексів на першому етапі поточного ремонту (визначення несправних підсистем або блоків) і порядок його реалізації, що дозволяє скоротити середній час відновлення за рахунок використання комплексного коефіцієнту при оцінці значення ймовірності переважного вибору елементів об'єкту.

Це дозволяє при постійному значенні середньої кількості перевірок за рахунок їх упорядочення до десяти відсотків скоротити середній час відновлення в порівнянні з відомими методами. Отримані результати доцільно використовувати під час розробки діагностичного забезпечення перспективних зразків засобів і комплексів спеціального зв'язку для підвищення ефективності їх поточного ремонту.

Подальші дослідження слід направити на розгляд можливості удосконалення процесу пошуку кратних (множинних) дефектів при відновленні працездатності об'єктів зі слабким ступенем аварійних або бойових пошкоджень в польових умовах фахівцями апаратних технічного забезпечення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вольнский А.А., Шаповалов В.Ф. Разработка экспертных систем технического диагностирования средств связи и автоматизации. Киев: КВВИУС, 1987. 225 с
2. Ксёэнз С.П. Основы технической диагностики средств и комплексов связи. Ленинград: ВАС, 1989. 192 с
3. Ксёэнз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. Москва: Радио и связь, 1989. 248 с
4. Ксёэнз С.П., Вольнский А.А., Климентов В.И. Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации. Ленинград: ВАС, 1990. 336 с
5. Ксёэнз С.П., Полтаржикский М.И., Алексеев С.П., Минеев В.В. Борьба с диагностическими ошибками при техническом обслуживании и ремонте систем управления связи и навигации. Санкт-Петербург: ВАС, 2010. 240 с
6. Kononov V.B., Ryzhov Ye.V., Sakovych L.N. Dependence of parameters of repair of military communication means on the quality of metrological support. *Advanced Information Systems*. 2018. Vol. 2, № 1. P. 91-95. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.17>
7. Ryzhov Ye.V., Sakovych L.N., Vankevych Petro. Optimization of requirements for measuring at metrological service of communication tools. *Measurement Journal of International Measurement Confederation*. 2018. Vol. 123. P. 19-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.03.055>
8. Сакович Л.М., Рижов Є.В., Коротченко Л.А. Методика визначення послідовності перевірки радіоелектронних комплексів при технічному обслуговуванні за станом. Львів: НАСВ, Збірник наукових праць № 22, 2020. С. 119-128
9. Василюшин В.І., Женжера С.В., Чечуй О.В., Глушко А.П. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем. Харків: ХНУПС, 2018. 268 с

Received (Надійшла) 12.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.03.2020

### Method of development of diagnosticalgorithms for radio electronic complexes

L. Sakovych, H. Krykhovetskyi, I. Hyrenko, Iu. Myroshnychenko

**Abstract.** The article considers the possibility of using a complex metric that considers the reliability, time, and cost metrics of checking individual subsystems of a large object to construct an algorithm for its diagnosis. This reduces the average recovery time of the complex by prioritizing the least reliable subsystems that require minimal labor and costs for inspection and renewal. A block diagram of a method that allows the use of a computer to automate the process of developing diagnostic support for promising samples of special communications tools and complexes is also provided. An example of how you use the method and how to quantify its effectiveness is given. The results obtained in the future allow us to reduce the time and cost of recovery for the ongoing repair of promising samples and special communication complexes.

**Keywords:** radio-electronic complexes, means of special communication, algorithm of diagnosis, probability of preferred choice.

О. А. Серков<sup>1</sup>, К. А. Трубочанінова<sup>2</sup>, Б. О. Лазуренко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

## ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

**Анотація.** Предметом вивчення є процеси забезпечення завадостійкості мобільних телекомунікаційних систем на ґрунті надширокопasmових сигналів з високою інформаційною ємністю. **Мета** – розробка рекомендацій щодо забезпечення завадостійкості надширокопasmової системи зв'язку при передачі дискретних повідомлень каналом зв'язку з адитивним гаусовим шумом. **Задача** – забезпечення усталеної та надійної роботи надширокопasmової системи зв'язку. Використані **методи**: методи аналітичного моделювання та теорії потенційної завадостійкості. Отримані наступні **результати**. Розроблено критерій забезпечення завадостійкості мобільних телекомунікаційних систем. На ґрунті теорії потенційної завадостійкості показана можливість усталеної та беззавадової роботи телекомунікаційної безпроводової системи в умовах, коли рівень інформаційного сигналу та шуму мають одне значення. Доведена можливість вилучення переданого інформаційного сигналу із суміші шуму та корисного сигналу шляхом кореляції прийнятого та опорного сигналів. Показана можливість розрізнення двох сигналів на фоні шуму, які найбільш імовірно було передано та прийнято по каналу зв'язку з білим гаусовим шумом. **Висновки.** Показано, що використання технології надширокопasmових сигналів дозволяє здійснити безпроводову приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання. Причому велика база сигналу  $B \geq 2.5$  дозволяє забезпечити усталену та беззавадову роботу телекомунікаційної системи за умов, коли рівень інформаційного сигналу знаходиться на рівні ( $q = 1$ ) чи нижче рівня шуму. При цьому доведена можливість вилучення як корисного сигналу із суміші сигналу та шуму, так і визначення з подальшим вилученням одного вірогідного сигналу із суміші двох повністю відомих сигналів  $s_0(t)$ ,  $s_1(t)$  із білим гаусовим шумом.

**Ключові слова:** рухомий зв'язок; завадостійкість; база сигналу; критерій завадостійкості; кореляція.

### Вступ

Проблема завадостійкості є однією з найбільш пріоритетних в сучасній безпроводовій техніці зв'язку. До традиційних засобів забезпечення завадостійкості відносять частотне планування, контроль за яким здійснюють національні та міжнародні інститути, використання антен із вузькою діаграмою спрямованості та інше. Розвиток технологій мобільних пристроїв, безпроводових персональних локальних мереж (wireless personal area networks – WPAN) та стрімкий розвиток Internet викликає все більшу нагальну потребу у підвищенні ємності мобільних мереж, для яких особливе значення мають низька вартість обладнання та незначне енергоспоживання. При цьому основною тенденцією їх розвитку є уніфікація персональних засобів комунікації, що означає можливість використання одного терміналу для з'єднання з інформаційними службами в різноманітних середовищах. У свою чергу це викликає потребу в отриманні високошвидкісних безпроводових систем зв'язку, що вимагає ефективного використання електромагнітного спектру [1, 2]. У той же час нагальною стає проблема забезпечення завадостійкості рухомих мобільних безпроводових пристроїв, що обумовлено вимогами до високої щільності каналів зв'язку на один квадратний метр робочої зони, їх пропускної здатності та завадостійкості в умовах дії ненавмисних та навмисних завад.

Особливість забезпечення завадостійкості в системах безпроводового зв'язку обумовлена необхідністю організації радіодоступу багатьох користувачів до обмеженого ресурсу – середовища передачі. Існує низка методів, які базуються на розподілі між окремими засобами мобільного зв'язку таких параметрів, як частота, час, код і простір із мінімумом взаємних завад та максимальним використанням

характеристик середовища передачі. Зробити інформаційний сигнал випромінювання непомітним для будь-яких приймачів, окрім того, кому його призначено, можливо за рахунок ускладнення закону модуляції та шляхом розширення його спектру. Такий сигнал майже не здатен чинити небажаний вплив на звичайну сторонню систему, яка працює в тій же смузі частот. Однак основним методом забезпечення завадостійкості в системах безпроводового мобільного зв'язку є зниження рівня електромагнітних полів [3-5]. При цьому задача полягає в обранні такого виграшу від обробки сигналу, який би гарантував достатньо низький рівень його спектральної щільності  $N_S$  відносно спектральної інтенсивності природного шуму  $N_0$  на вході приймача.

### Критерій забезпечення завадостійкості мобільних телекомунікаційних систем

Забезпечити необхідний рівень завадостійкості телекомунікаційних систем рухомого зв'язку, здатна технологія надширокопasmового зв'язку. Суть її полягає у передачі малопотужних кодованих імпульсів в дуже широкій смузі частот без несучої частоти. Причому широкопasmовість системи визначає не абсолютна величина ширини використаної смуги частот, а співвідношення спектру повідомлення, який визначено швидкістю отримання інформації, та шириною спектра сигналу [6]. Припустимо, що  $\Delta F$  є шириною спектру повідомлення,  $W$  – ширина спектру сигналу, а  $T$  – тривалість сигналу. Добуток  $B = WT$  є базою сигналу. Зазвичай для широкопasmових систем  $W \gg \Delta F$  та  $B \gg 1$ . Розширюючи смугу частот із  $\Delta F$  до  $W$  виникає можливість збільшення швидкості передачі інформації, укорочуючи передані сигнали з величини  $T \cong 1/\Delta F$  до  $T_1 \cong 1/W$ , причому  $T_1 \ll T$ . Таким чином до переданого сигналу вводять деяку надмірність, величину якої визначає кое-

фіцієнт розширення спектру  $K_f \cong W/\Delta F$ . Саме наявність цієї надмірності визначає такі властивості надширококутових систем, як можливість переборення явища багатопроменевості, усталеність до завад, та можливість ефективного використання спектру під час використання переважаного частотного діапазону та цифрової обробки сигналу.

Зазвичай, нижня межа співвідношення спектральних щільностей сигналу  $N_S$  та завади  $N_0$  у  $-7$  дБ на вході приймача гарантує його нормальну роботу. Цей рівень відповідає співвідношенню:

$$N_S/N_0 \leq 0.2. \quad (1)$$

У той же час спектральну щільність  $N_S$  визначають наступним співвідношенням:

$$N_S = P/W = E/(WT), \quad (2)$$

де  $F$  – потужність сигналу;  $W$  – ширина спектру сигналу;  $E$  – енергія сигналу;  $T$  – тривалість сигналу. Таким чином, з урахуванням (1), (2) критерієм завадостійкості стає вирішення наступної нерівності:

$$E/(WT) \leq 0.2. \quad (3)$$

Згідно теорії потенціальної завадостійкості Котельнікова В.А. [7] характеристики інформаційного сигналу залежать від відношення подвійної енергії сигналу  $E$  до спектральної щільності потужності шуму  $N_0$  та складає величину:

$$Q = 2E/N_0 = 2q_0B,$$

де  $q_0 = (E/T)/(N_0W)$  – відношення середньої потужності сигналу  $P_{S0} = E/T$  до потужності шуму  $P_{N0} = N_0W$  на вході приймача, а  $B = WT$  є базою сигналу. При цьому (3) прийме такого вигляду:

$$q^2/(WT) \leq 0.4, \quad (4)$$

де сам критерій визначено у термінах відношення сигнал / шум на вході приймача  $q$  та виграшу від обробки  $WT$ .

Зниження рівня електромагнітного випромінювання є основним методом забезпечення завадостійкості в системах безпроводового мобільного зв'язку. Тому сприятливим щодо забезпечення усталеної беззавадової роботи є зниження інформаційного сигналу на вході приймача до рівня шуму ( $q = 1$ ). Це обумовлює критерій щодо забезпечення завадостійкості телекомунікаційних систем безпроводового мобільного зв'язку ( $WT \geq 2.5$ ). Таким чином, для забезпечення завадостійкості безпроводових мобільних систем найбільш доцільним є застосування технології надширококутових сигналів з базою сигналу  $B \geq 2.5$ . При цьому виникає задача вилучення інформаційного сигналу на фоні шуму.

### Виявлення сигналу на фоні шуму

Вилучення корисного сигналу на фоні шуму здійснюють шляхом кореляції прийнятого та опорного сигналів. Корелятор виконує згортку прийнятого сигналу з еталонним. Він є ідеальним детектором для визначення часових зсувів прийнятих імпульсів відносно опорних. Так при прийомі

одиниці кореляційна функція дорівнює +1, а при прийомі 0 – приймає значення -1. У будь-яких інших випадках кореляційна функція дорівнює 0. Накопичення в кореляторі приймача певної кількості надкоротких імпульсів, що кодують кожен з інформаційних бітів, дають можливість суттєво підвищити співвідношення сигнал/шум, забезпечуючи можливість передачі інформації в широкому частотному діапазоні значно нижче рівня білого шуму, забезпечуючи при цьому вимоги щодо завадостійкості рухомих мобільних пристроїв.

Реальні повідомлення зазвичай є нестационарними, тому їх моделі також є нестационарними випадковими процесами, які припускають квазістационарну трактовку. Їх можна вважати практично стационарними на проміжках часу невеликої тривалості. Перехід до стационарної моделі обумовлено тим, що вирішення задач із урахуванням нестационарності повідомлень викликає ускладнення та вимагає складного математичного апарату. Тому у якості стационарних моделей повідомлень, сигналів і завад використовують гаусівський випадковий процес, який однозначно визначає математичне очікування  $m$  та кореляційна функція  $R(\tau)$ .

Використання надширококутових сигналів надає безпроводовому каналу зв'язку такі вади, як висока завадозахищеність, уникнення завмирань сигналу в каналах із багатопроменевою, забезпечення багатостанційного доступу з одночасною роботою багатьох радіотехнічних систем в одному й тому ж діапазоні частот, забезпечення електромагнітної сумісності з вузькосмуговими радіотехнічними системами. Причому надширококутовими вважаємо такі сигнали, для яких виконується співвідношення:

$$B = F_c T_c \gg 1,$$

де  $B, F_c, T_c$  – база, ширина спектру і тривалість сигналу відповідно.

Імовірнісний метод передачі інформації полягає у застосуванні кореляційного методу для обробки сигналів, які на вході приймача мають вигляд.

$$u(t) = \lambda s(t) + n(t),$$

де  $u(t)$  – прийнятий сигнал;  $s(t)$  – корисний сигнал;  $n(t)$  – гаусівський шум;  $\lambda$  – випадкова величина, що приймає значення 1 чи 0 із імовірностями  $p$  чи  $1-p$  відповідно.

Щоб за прийнятим сигналом  $u(t)$  на фоні гаусівського адитивного шуму  $n(t)$  із спектральною щільністю  $N_0$  в смузі пропускання приймача  $\Delta f$  вирішити, чи є у наявності корисний сигнал  $s(t)$  слід обчислювати відношення функцій правдоподібності  $l(u) = W(u/H_1)/W(u/H_0)$  та порівнювати його із деяким порогом  $l_0$ , який визначено за критерієм ідеального спостерігача:  $l_0 = (1-p)/p$ .

Критерій ідеального спостерігача обрано тому, що будь – які помилки під час прийому символів небажані, та втрати, пов'язані з цими помилками, однакові. Функції  $W(u/H_1)$  та  $W(u/H_0)$  є функціями правдоподібності. У випадку наявності корис-

ного сигналу справедливою є гіпотеза  $H_1$ , а у випадку його відсутності – справедлива гіпотеза  $H_0$ . Логарифм відношення функцій правдоподібності має наступний вигляд:

$$\ln l(u) = \frac{E}{N_0} + \frac{2}{N_0} \int_0^T u(t)s(t)dt,$$

де:  $E$  – енергія сигналу;  $T$  – тривалість сигналу.

З урахуванням цього співвідношення слід обчислити інтеграл:

$$q = \frac{2}{N_0} \int_0^T u(t)s(t)dt \quad (5)$$

та порівняти його значення з порогом:

$$z_0 = \ln l_0 + E/N_0.$$

При перевищенні порогу, рішення приймається на користь гіпотези  $H_1$ , у іншому випадку - на користь гіпотези  $H_0$ . Таким чином співвідношення (1) є мірою взаємної кореляції між прийнятим сигналом  $u(t)$  та очікуваним корисним сигналом  $s(t)$ . Умовні імовірності хибного визначення  $\alpha$  і пропуску  $\beta$  сигналу визначають такі співвідношення:

$$\alpha = p \left\{ q \geq \ln l_0 + \frac{E}{N_0} / H_0 \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} W \left( \frac{q}{H_0} \right) dq, \quad (6)$$

$$\beta = p \left\{ q < \ln l_0 + \frac{E}{N_0} / H_1 \right\} = \int_{-\infty}^{z_0} W \left( \frac{q}{H_1} \right) dq, \quad (7)$$

де:  $W(q/H_1)$  та  $W(q/H_0)$  – розподілення напруги на вході кореляційного приймача за умов справедливості гіпотез  $H_1$  та  $H_0$  відповідно.

Із урахуванням співвідношення (1) отримуємо:

$$W(q/H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 2E/N_0}} \exp\left(-q^2/(4E/N_0)\right), \quad (8)$$

$$W(q/H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 2E/N_0}} \exp\left(-\left(q - \frac{2E}{N_0}\right)^2 / \left(2 \frac{2E}{N_0}\right)\right). \quad (9)$$

Таким чином умовні імовірності хибного визначення сигналу  $\alpha$  та пропуску сигналу  $\beta$  є такими.

$$\alpha = \int_{z_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi \frac{2E}{N_0}}} \exp\left(-\frac{q^2}{2 \frac{2E}{N_0}}\right) dq = 1 - \Phi\left(\frac{\ln l_0 + \frac{E}{N_0}}{\sqrt{\frac{2E}{N_0}}}\right);$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{z_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 2E/N_0}} \exp\left(-\left(q - \frac{2E}{N_0}\right)^2 / \left(2 \frac{2E}{N_0}\right)\right) dq = \Phi\left(\left(\ln l_0 + E/N_0\right) / \sqrt{2E/N_0}\right),$$

де  $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp(-z^2/2) dz$  – інтеграл імовірності.

## Розрізнення двох відомих сигналів на фоні білого шуму

Сигнал на вході приймача являє суму завади та одного з двох відомих сигналів. Задача полягає у тому, щоб по прийнятій сумі сигналів вирішити, який з сигналів передається. Цифровий двійковий код передбачає визначення двох повністю відомих сигналів  $s_0(t)$  та  $s_1(t)$  на фоні білого гаусівського шуму. У цьому випадку сигнал на вході приймача.

$$u(t) = \lambda s_1(t) + (1 - \lambda) s_0(t) + n(t),$$

де  $u(t)$  – прийнятий сигнал;  $s(t)$  – корисний сигнал;  $n(t)$  – гаусівський шум із спектральною щільністю  $N_0$ ;  $\lambda$  – випадкова величина, що приймає значення 1 чи 0 із імовірностями  $p$  чи  $1-p$  відповідно.

Необхідно за прийнятим сигналом  $u(t)$  визначити, який з корисних сигналів  $s_0(t)$  чи  $s_1(t)$  передавався. Таким чином слід здійснити вибір між гіпотезою  $H_0$ , коли в наявності сигнал  $s_0(t)$  чи альтернативною гіпотезою  $H_1$ , коли в наявності сигнал  $s_1(t)$ . За критерій оптимальності також обрано критерій ідеального спостерігача. При цьому рішення приймається на користь гіпотези  $H_1$ , коли  $l(u) \geq l_0$ , чи на користь гіпотези  $H_0$  коли  $l(u) < l_0$ . У цьому випадку логарифм відношення правдоподібності визначається як:

$$\ln l(u) = \frac{E_1 - E_0}{N_0} + \frac{2}{N_0} \int_0^T u(t)[s_1(t) - s_0(t)] dt,$$

де  $E_1$  та  $E_0$  – енергія сигналів  $s_0(t)$  та  $s_1(t)$  відповідно. Зазвичай,  $E_1 = E_0$ , а  $p = 1/2$ . При цьому рішення приймається на користь сигналу  $s_1(t)$ , коли

$$q = \frac{2}{N_0} \int_0^T u(t)[s_1(t) - s_0(t)] dt \geq 0. \quad (10)$$

Середня імовірність похибки для випадку рівноімовірних сигналів матиме наступний вигляд:

$$P_p = (\alpha + \beta) / 2,$$

де  $\alpha = \int_{\ln l_0}^{\infty} W(q/H_0) dq$ ,  $\beta = \int_{-\infty}^{\ln l_0} W(q/H_1) dq$  – умовні

імовірності щодо прийняття рішення про наявність сигналу  $s_1(t)$  ( $s_0(t)$ ), у той час, коли у дійсності передавався сигнал  $s_0(t)$  ( $s_1(t)$ ).

Знайдемо імовірності  $\alpha$  та  $\beta$ . Визначимо щільності імовірностей  $W(q/H_1)$  і  $W(q/H_0)$ . Випадкова величина  $q$  за наявності сигналу  $s_1(t)$ .

$$q = q_1 = \frac{2}{N_0} \int_0^T [s(t) + n(t)][s_1(t) - s_0(t)] dt.$$

З урахуванням того, що  $n(t)$  – гаусівський шум, сигнали  $s_0(t)$  та  $s_1(t)$  – детерміновані функції, а усі операції, які здійснюються у цьому співвідношенні лінійні, то випадкова величина  $q_1$  буде розподілена за нормальним законом. Її середнє значення буде:



$$M\{q_1\} = 2E(1 - R_S)/N_0.$$

Дисперсію визначає таке співвідношення:

$$\sigma_{q_1}^2 = \frac{4E(1 - R_S)}{N_0},$$

де

$$q_1 = \frac{2}{N_0} \int_0^T [s(t) + n(t)][s_1(t) - s_0(t)] dt.$$

### Аналіз

Аналіз проблеми забезпечення вимог заводостійкості рухомих мобільних безпроводових пристроїв показав, що основним методом її вирішення є зниження рівня випромінювання електромагнітних полів. На ґрунті теорії потенціальної заводостійкості Котельнікова В.А. показана можливість усталеної та беззавадової роботи телекомунікаційної безпроводової системи в умовах, коли рівень інформаційного сигналу та шуму мають одне значення. Показана можливість вилучення переданого інформаційного сигналу із шуму шляхом кореляції прийнятого та опорного сигналів, а також визначити, який з двох переданих корисних сигналів найбільш імовірно було передано та прийнято.

### Висновки

Використання технології надширококутних сигналів дозволяє здійснити безпроводову приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання. Застосування великої бази сигналу  $B \geq 2.5$  дозволяє забезпечити усталену та беззавадову роботу телекомунікаційної системи за умов, коли рівень інформаційного сигналу знаходиться на рівні чи нижче рівня шуму ( $q = 1$ ). При цьому, доведена можливість вилучення шляхом кореляції прийнятого та опорного сигналів як корисного сигналу на фоні шуму, так і двох повністю відомих сигналів  $s_0(t)$  та  $s_1(t)$  на фоні білого гаусівського шуму.

### Вдячність

Цю роботу було частково профінансовано Європейським Союзом у контексті проекту «dComFra – Digital competence framework for Ukrainian teachers and other citizens» (Project Number: 598236-EPP-1-2018-1-LT-EPPKA2-SBHE-SP) за програмою ERASMUS+. Підтримка Європейською Комісією створення цієї роботи не означає повного схвалення її змісту, який віддзеркалює лише погляди авторів. Комісія не може нести відповідальності за будь-яке використання інформації, яку розміщено в цій роботі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соколова М.В. *Сверхширокополосная беспроводная связь: история и перспективы развития*. - Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. -2008. -С-50-55.
2. Аджемов С.С., Соколова М.В., Урядников Ю.Ф., Штыркин В.В. Сверхширокополосная связь — результат развития технологий широкополосного доступа. — Электросвязь, 2006. — №2. — с. 18-23
3. Serkov, A. Noise-like signals in wireless information transmission systems / A. Serkov, V. Breslavets, M. Tolkachov, G. Churyumov, Issam Saad // *Advanced Information Systems*. – 2017. – Vol. 1, №2 – P. 33 – 39, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.06>.
4. Рішення Федеральної комісії по зв'язку (FCC) США № FCC 02-48 від 14/02/2002 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf). – Дата доступу :31.12.2019.
5. Serkov, O. A. (2019). On the issue of solving the problem of electromagnetic compatibility of the wireless telecommunication Systems / O. A. Serkov, G. I. Churyumov // *Applied Radio Electronics*. – 2017. – Vol. 16 № 3, 4. – P. 117-121.
6. Serkov A., Trubchaninova K., Mezitis M. (2019), Method of wireless transmission of digital information on the basis of ultra-wide signals, *Advanced Information Systems*, Vol.3, No. 4. pp. 33-38, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.04>.
7. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 151 с

Received (Надійшла) 27.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.04.2020

### Noise stability of mobile telecommunication systems

A. Serkov, K. Trubchaninova, B. Lazurenko.

**Abstract.** The subject of study is the processes of ensuring electromagnetic compatibility of mobile telecommunication systems based on ultra-wideband signals with high information capacity. The goal is to develop recommendations for ensuring electromagnetic compatibility of an ultra-wideband communication system when transmitting discrete messages by a communication channel with additive Gaussian noise. The task is to ensure the stable and reliable operation of an ultra-wideband communication system. Methods used: methods of analytical modeling and theory of potential noise immunity. The following results are obtained. A criterion for ensuring the requirements of electromagnetic compatibility of mobile telecommunication systems has been developed. Based on the theory of potential noise immunity, the possibility of stable and interference-free operation of a telecommunication wireless system in conditions where the level of the information signal and noise have the same value is shown. The possibility of removing the transmitted information signal from the mixture of noise and the useful signal by correlating the received and reference signals is proved. The possibility of distinguishing two signals against the background of noise is shown; it was most likely transmitted and received through a communication channel with white Gaussian noise. Conclusions. It is shown that the use of ultra-wideband signal technology allows wireless covert transmission of information with low radiation power. Moreover, a large signal base  $B \geq 2.5$  allows for stable and interference-free operation of the telecommunication system in conditions when the level of the information signal is at the level ( $q = 1$ ) or below the noise level. At the same time, the possibility of extracting both the useful signal and the sum of the signal and noise, and the determination with the subsequent removal of one possible signal from the mixture of two completely known signals,  $s_0(t)$ ,  $s_1(t)$  with white Gaussian noise, is proved.

**Keywords:** mobile communications; noise immunity; signal base; noise stability criterion; correlation.

І. І. Слюсарь, В. І. Слюсар, С. В. Зуб, Д. Ю. Телешун

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

## ШИРОКОСМУГОВІ АНТЕНИ НА ОСНОВІ КІЛЬЦЕВОЇ ГЕОМЕТРІЇ

**Анотація.** В роботі розглянуто варіанти моделей квазіфрактальних кільцевих структур. Для їх синтезу запропонований векторний опис фрактальної трансформації окремих сегментів початкової геометричної форми. Поєднання декомпозиції геометричної форми та багатовимірного фрактального підходу дозволяє спростити синтез фрактальних 3D-структур та/або використовувати кілька видів фракталів, у тому числі, з різною кількістю ітерацій. Такий підхід дозволяє досягти широкосмуговості та багатодіапазонності антенних систем. При цьому досліджено вплив рівня сегментації та варіантів схеми живлення на просторово-частотні характеристики антени. Через складність опису взаємодії антен неевклідової геометрії з радіохвилями для їх синтезу та аналізу обрано методи чисельного моделювання. Для аналізу просторово-частотних характеристик проєктованих антенних рішень використані такі показники, як зворотні втрати, діаграма спрямованості та коефіцієнт стоячої хвилі. Отримані оцінки відносної смуги пропускання  $\delta f = 0,9$  свідчать про перспективність запропонованого підходу для реалізації антенних систем з високим рівнем широкосмуговості.

**Ключові слова:** антена, діаграма спрямованості, зворотні втрати, квазіфрактал, коефіцієнт стоячої хвилі, фрактал.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасні тенденції щодо мінімізації телекомунікаційних засобів вимагають впровадження компактних комбінованих інтегральних антен, які мають відповідні рівні багатодіапазонності та широкосмуговості [1].

Аналіз сучасних технічних рішень, що дозволяють забезпечити відповідність зазначеним вимогам, свідчить, що вони в основному зводяться до застосування електрично-малих антен [2]; впровадження геометрії фракталів [3]; введення елементів на основі діелектричних резонаторних антен (DRA) [4-6]; формування багатоелементних решіток; реалізації комбінацій зазначених конструктивних підходів.

Одним з варіантів вказаної інтеграції може бути використання різноманітних модифікацій антенних елементів на базі простих геометричних фігур, наприклад: квадрату, ромбу, трикутника або кола. Серед них, найбільше підсилення має кільцева структура. В даному випадку, проглядається фізика роботи подібної антени – чим більший простір вона охоплює, тим вище підсилення, яке забезпечується нею. Смуга пропускання таких структур ширше, ніж у звичайного диполя в кілька разів. Однак, у порівнянні з ним, вони мають високий вхідний опір.

В свою чергу, застосування фрактального підходу дозволяє певною мірою вирішити це питання, а також розширити смугу пропускання та сформувати кілька резонансних частот. Крім того, останнім часом з'явилося багато робіт, в яких розглядаються квазіфрактальні структури. Як відомо [7], термін «квазіфрактал» описує антени, що не мають строго визначеної прогресії повторюваності елементів при кожній зміні масштабу, або в них існує неповна (неточна) подібність структури та її елементів. В цілому, номенклатура подібних антен постійно розширюється.

Як наслідок, доцільно виконати оцінку антенних рішень, в яких геометрія кільцевого випромінювача описується тим чи іншим фракталом (квазіфракталом).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Систематизація існуючих джерел, що пов'язані з даною проблематикою дозволяє виділити кілька узагальнених напрямів досліджень.

Традиційно, кільцеві структури є базисом для удосконалення класичних антен або решіток на їх основі (рамкових, логоперіодичних та ін.) [7, 8].

Другий напрям передбачає реалізацію фрактального підходу для формування антени шляхом масштабування складних антенних елементів на базі кола [9, 10].

В даному сенсі слід також згадати антени на основі класичних геометричних фракталів, що вписані у коло, наприклад, сніжинка Коха. Зазвичай, для зазначених фракталів, що застосовують в антенній техніці, в якості ініціатора використовують пряму лінію.

Найбільш перспективним виглядає інтеграція кількох антенних технологій та рішень з кільцевими структурами. Так, в [7, 11-14] запропоновані квазіфрактальні діелектричні резонаторні антени (Dielectric Resonator Antenna, DRA) на основі простих геометричних фігур. В якості опромінювача в них застосований класичний кільцевий вібратор (тобто фрактальний підхід використовується лише до геометрії напівсферичних діелектричних складових) [15].

В цілому, проведений аналіз існуючих антенних рішень свідчить, що у теоретичному плані поки що недостатньо опрацьовані антени на базі фрактальних кільцевих структур, в тому числі, при одночасному застосуванні кількох видів фракталів. Все це свідчить про актуальність досліджень.

**Мета роботи:** підвищення ефективності антенних систем на основі кільцевих структур за рахунок використання фрактального підходу.

### Основна частина

Для вирішення основної задачі досліджень в роботі запропоновано поєднати декомпозицію початкової геометричної форми та багатовимірну фрактальну трансформацію. Це дозволяє спростити син-

тез фрактальних 3D-структур та/або використовувати кілька видів фракталів, у тому числі, з різною кількістю ітерацій. Отримані переваги особливо наочно проявляються для форм, пріоритетний опис яких спирається на сферичну або циліндричну системи координат.

Сутність такого підходу базується на векторному описі фрактальної трансформації окремих сегментованих частин початкової геометричної форми. Так, для 3D-фігури даний вектор може містити чотири складові: перша описує закон геометричної фрактальної трансформації відносно координатної осі  $Ox$ , відповідно, друга –  $Oy$ , третя –  $Oz$ , а четверта – зміну характеристики матеріалу (наприклад, діелектричної проникності). При цьому, кількість ітерацій для кожної з цих складових може відрізнитись. В свою чергу, в інших геометричних сегментах можуть застосовуватись (або взагалі не застосовуватись) відмінні варіанти фрактальної трансформації. Також, для забезпечення цілісності синтезованої структури іноді необхідно передбачати перекриття сегментів.

Для розуміння процесу  $n$ -вимірної фрактальної трансформації в роботі розглянутий найпростіший варіант – синтез квазіфрактального кільцевого вібратора. В даному випадку, в якості ініціатора фракталу виступає дуга, а генератором є меандр. Для формування меандру необхідне залучення двох сегментів. З метою спрощення процесу моделювання введено низку припущень.

1. В якості базового елемента розглядається кільцевий вібратор (рис. 1.а), який виготовлений з міді. Він являє собою стрічку шириною 4,5 мм з фіксованою товщиною (0,75 мм), що співпадає з діаметром провідного кільцевого вібратора (рис. 1.б) за аналогією з [7, 11-14]. При цьому, зовнішній діаметр синтезованих антенних елементів не перевищує зовнішній діаметр дротового кільцевого вібратора (24,4 мм).

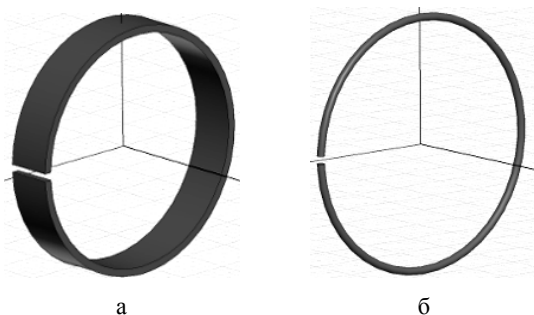


Рис. 1. Кільцевий вібратор на основі:  
а – стрічки; б – дроту

2. Через складність опису взаємодії антен неевклідової геометрії з радіохвилями для їх синтезу та аналізу обрано методи чисельного моделювання. Під час оцінювання просторово-частотних характеристик проєктованих антенних рішень в діапазоні до 40 ГГц розглядаються такі показники, як зворотні втрати (Return Loss, RL), діаграма спрямованості (beam pattern, BP) та коефіцієнт стоячої хвилі (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) [16]. Хоча іс-

нує кілька тлумачень поняття смуги пропускання, в роботі використовується визначення смуги за критерієм зворотних втрат [17], для якого модуль  $S_{11}$ , менший, ніж -10 дБ (хоча більш точно для  $VSWR \leq 2$  відповідає рівень  $RL \leq -9,542$  дБ).

В свою чергу, для визначення рівня широкосмуговості антени можливо використовувати такий параметр як відносна смуга пропускання (в закордонних джерелах трактується як «Fractional Bandwidth» [10]):

$$\delta F = \frac{2|f_1 - f_2|}{f_1 + f_2},$$

де  $f_1$  і  $f_2$  – номінали частот, на яких величина VSWR або RL перевищують заданий рівень.

3. В якості основної розглядається циліндрична система координат. Декомпозиція початкової геометричної форми передбачає лише цілочисельне значення кутової розмірності сегментів (в град.) за виразом:  $Angle_{seg} = 360 / N$ . Кількість сегментів  $N$  можливо визначити з табл. 1. Для забезпечення цілісності синтезованої структури величина перекриття сегментів відповідає товщині стрічки кільцевого вібратора (див. рис. 1).

Таблиця 1 – Кутова розмірність сегментів

$N$	$Angle_{seg}$ (град.)	$N$	$Angle_{seg}$ (град.)	$N$	$Angle_{seg}$ (град.)
1	360	11	32,73	21	17,14
2	180	12	30	22	16,36
3	120	13	27,69	23	15,65
4	90	14	25,71	24	15
5	72	15	24	25	14,4
6	60	16	22,5	26	13,85
7	51,43	17	21,18	27	13,33
8	45	18	20	28	12,86
9	40	19	18,95	29	12,41
10	36	20	18	30	12

4. Для живлення антенного елемента застосована схема без узгодження за опором, яка містить лише один порт. Він може мати довільне розташування.

5. Для спрощення порівняння з просторово-частотними характеристиками первинних вібраторів фрактальній трансформації на рівні першої ітерації підлягає лише тангенціальна складова поверхні кільця (при використанні циліндричної системи координат).

Надалі, з врахуванням введених припущень, слід розглянути процес формування квазіфрактального кільцевого вібратора, що містить 24 сегменти. Кутовий розмір одного сегмента дорівнює  $15^\circ$ .

Для наочності, сегменти можливо умовно поділити на парні та непарні (рис. 2). Сегменти мають взаємне перекриття, що дорівнює товщині стрічки кільцевого вібратора (рис. 1, а). Утворені зони перекриття формують шаблон для радіальної складової синтезованої геометричної форми (рис. 3).

Згідно припущень, вона не підлягає фрактальній трансформації. Використовуючи логічні операції

інверсії, з'єднання, диз'юнкції, а також, в якості генератора фракталу – меандр, можливо сформувати 24-сегментний квазіфрактальний кільцевий вібратор (рис. 4). Висота меандру (1,5 мм) характеризується відстанню між зовнішню та внутрішню радіальними складовими вібратора.

Відповідно, на рис. 5 наведено приклади 9-, 15- та 30-сегментних шаблонів.

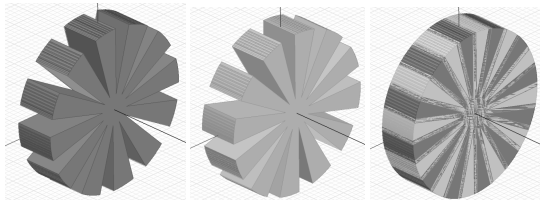


Рис. 2. Шаблон сегментації

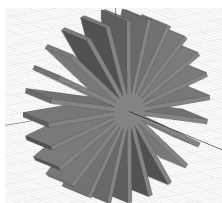


Рис. 3. Шаблон для радіальної складової

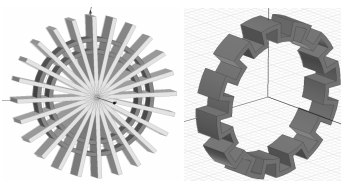


Рис. 4. Синтез квазіфрактального кільцевого вібратора

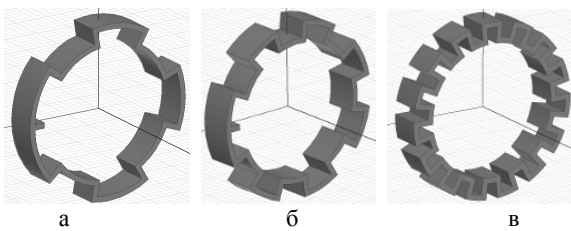


Рис. 5. Шаблон для багатосегментного квазіфрактального кільцевого вібратора: а –  $N=9$ ; б –  $N=15$ ; в –  $N=30$

Окремої уваги заслуговує пошук оптимального розміщення порту схеми живлення. Для непарного  $N$  в роботі розміщення порту відповідає рис. 6. Для парного  $N$  кількість досліджуваних варіантів трохи розширена (рис. 7).

В ході досліджень виконано порівняння первинних кільцевих вібраторів (див. рис. 1). Приклади оцінок наведено на рис. 8 і 9. Як видно, використання стрічки замість дроту дещо покращує характеристики, але не задовольняє вимогам щодо багатодіапазонності та широкосмуговості.

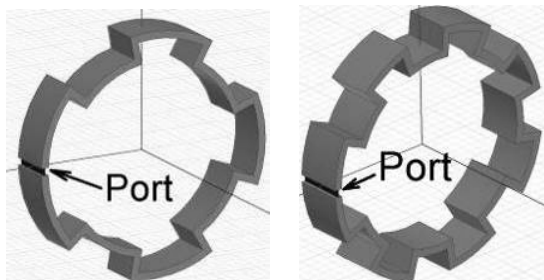


Рис. 6. Розміщення порту живлення при непарному  $N$

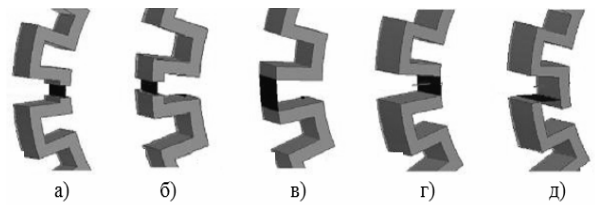


Рис. 7. Приклад розміщення порту живлення для 30-сегментного квазіфрактального кільцевого вібратора

З іншого боку, порівняння кільцевих структур, що наведені на рис. 1, а і рис. 4 свідчить про позитивні наслідки використання фрактального підходу. Мінімальний рівень RL сягає -28 дБ, а на частоті вище 17 ГГц –  $VSWR < 2$ . За умов відповідного розташування порту живлення (рис. 7, г) за обраним критерієм, смуга пропускання складає 18,125 ГГц ( $\delta f = 0,64$ ).

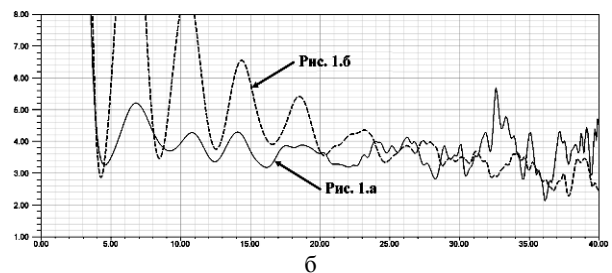
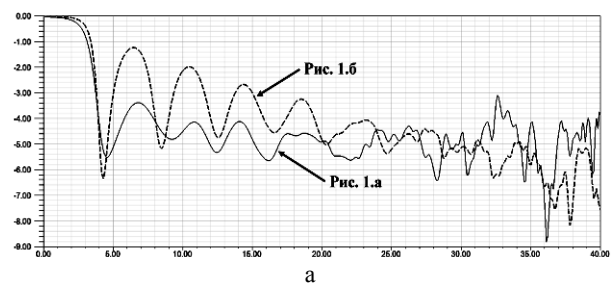


Рис. 8. Порівняльні оцінки частотних характеристик базових кільцевих вібраторів: а – RL; б – VSWR

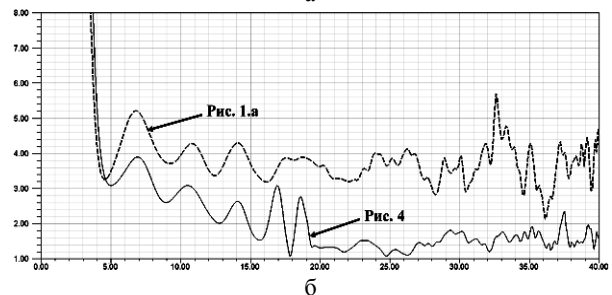
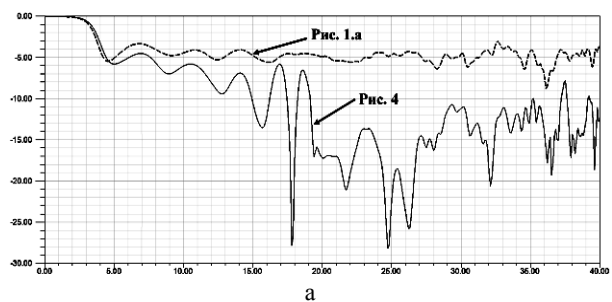


Рис. 9. Порівняльні оцінки частотних характеристик квазіфрактальних кільцевих структур: а – RL; б – VSWR

Для якісної оцінки залежності просторово-частотних характеристик від рівня сегментації на рис. 10 наведено попарне порівняння для вібраторів з кількістю сегментів 24 і 30, а на рис. 11, а – ВР для випадку  $N = 24$ .

В цілому, отримані варіанти кільцевої структури можна вважати широкосмуговими [18], оскільки  $\delta f = 0,64$ , а це більше за 0,1. Однак, з урахуванням існуючих телекомунікаційних додатків [19] необхідні антенні рішення, які б забезпечили зниження номіналу нижньої граничної частоти смуги пропускання.

Як наслідок, доцільно розширити номенклатуру синтезованих 3D-компонок квазіфрактальних антен за рахунок використання 2-кільцевих вібраторів.

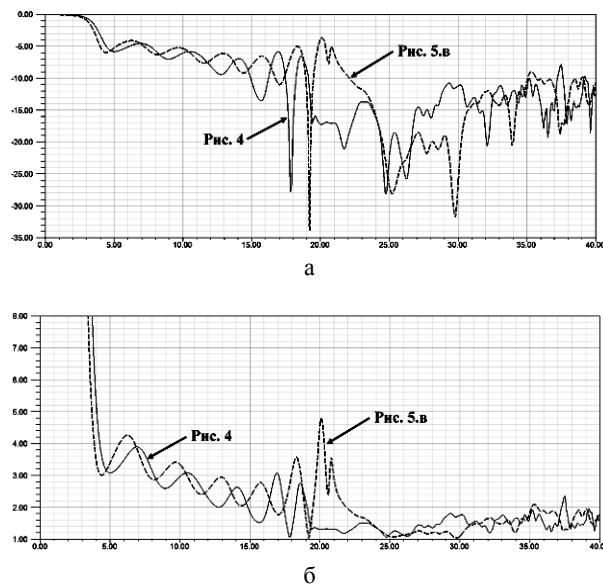


Рис. 10. Порівняльні оцінки частотних характеристик синтезованих кільцевих структур: а – RL; б – VSWR

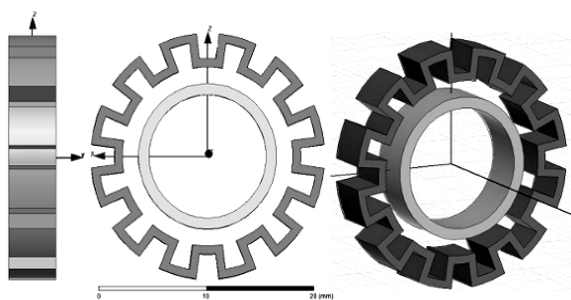


Рис. 11. Базова модель 2-кільцевого вібратора

Таким чином, в якості базової розглядається геометрія антени, яка наведена на рис. 11. Під час моделювання прийнято, що простір між кільцями ідентичний середовищу навколо кіл. Кільця виконані у вигляді мідних стрічок, які мають незмінні діаметр, товщину, ширину та взаємне розташування їх центрів симетрії. Відповідно, товщина стрічок дорівнює 1,5 мм, ширина – 4,5 мм. Відстань між кільцями дорівнює товщині стрічок (1,5 мм). Зовнішній радіус синтезованої моделі не перевищує 22,5 мм.

Як і в попередньому випадку, подальшим етапом став пошук оптимальної схеми живлення за рахунок вибору розміщення порту схеми живлення антени (рис. 12), а також апертури «розкриву» зовнішнього кільця (рис. 13, а).

Цей параметр описується двома незалежними змінними:  $Angle1$  (змінюється в межах від 0 до  $15^{\circ}$ ) і  $Angle2$  (змінюється в межах від 0 до  $-15^{\circ}$ ), що дозволяє формувати несиметричний «розкриття» відносно УХ-площини.

В ході досліджень встановлено, що максимальна смуга пропускання ( $\delta f = 0,77$ ) досягається при  $Angle1 = 7,5^{\circ}$   $Angle2 = -15^{\circ}$  і розташуванні порту між кільцями (рис. 13, б).

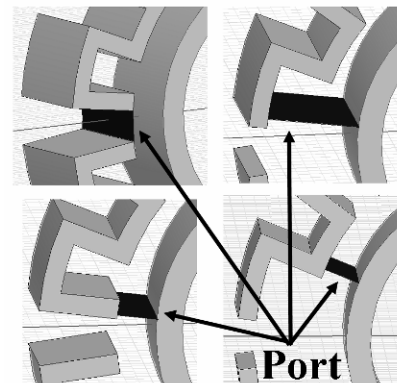


Рис. 12. Варіанти розміщення порту схеми живлення для 2-кільцевого вібратора

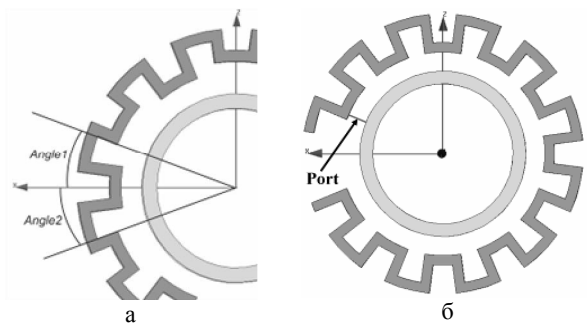


Рис. 13. Модель 2-кільцевого вібратора: а – формування апертури «розкриття»; б – компоновка антени

При цьому досягається бажаний ефект щодо зниження нижньої граничної частоти смуги пропускання з 18 до 8 ГГц і підвищення рівня широкосмуговості на 13 % (рис. 14).

Наступним кроком оптимізації параметричних моделей була зміна форми апертури «розкриття», а також глибини фрактальної трансформації тангенціальної складової зовнішнього периметру квазіфрактального кільця у шаховому порядку (рис. 15). Однак, такі кроки не дали істотного покращення просторово-частотних характеристик антени. Тому, надалі проведена модифікація конструкції за рахунок зміни глибини фракталізації тангенціальної складової внутрішнього периметру квазіфрактального кільця у шаховому порядку (рис. 16, а). При цьому фіксувалася зовнішня поверхня кільця, а висота мандру змінювалася на товщину стрічки.

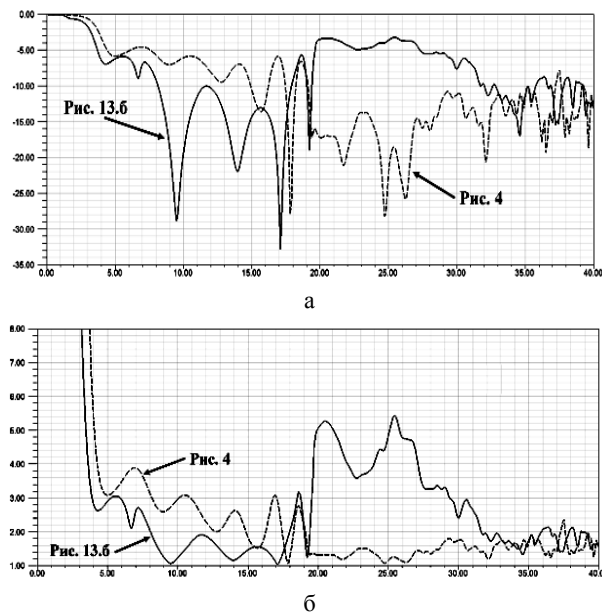


Рис. 14. Порівняльні оцінки частотних характеристик однокільцевої та 2-кільцевої квазіфрактальних структур: а – RL; б – VSWR

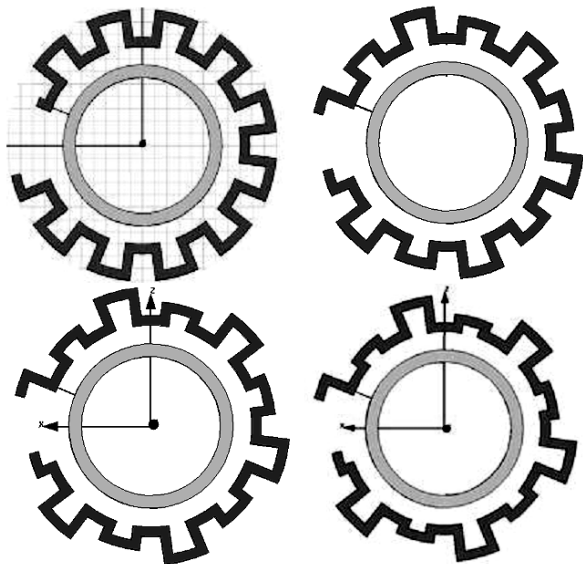


Рис. 15. Варіанти геометрії 2-кільцевої квазіфрактальної структури

Такий підхід дозволив отримати  $\delta f = 0,81$  в межах 8,41...19,92 ГГц. При цьому, найменший рівень RL (-29,16 дБ) відповідає частоті 9,76 ГГц.

Для використання всього потенціалу моделей 2-кільцевого вібратора, в роботі запропоновано використання «монолітного» внутрішнього кільця (рис. 16.б) у вигляді диску, а також його трансформація, наприклад, як наведено на рис. 16.в. Найбільш вдалі конфігурації забезпечують смугу пропускання на рівні  $\approx 13,4$  ГГц. Так, модель, що зображена на рис. 16.б має RL = -33,6 дБ на частоті 9,7 ГГц і  $\delta f = 0,9$  (8,16...21,57 ГГц).

В свою чергу, найнижчий рівень зворотних втрат (RL = -40 дБ) відповідає моделі, яка наведена на рис. 17.а. Вона має смугу пропускання 13,4 ГГц в межах 8,37...21,77 ГГц.

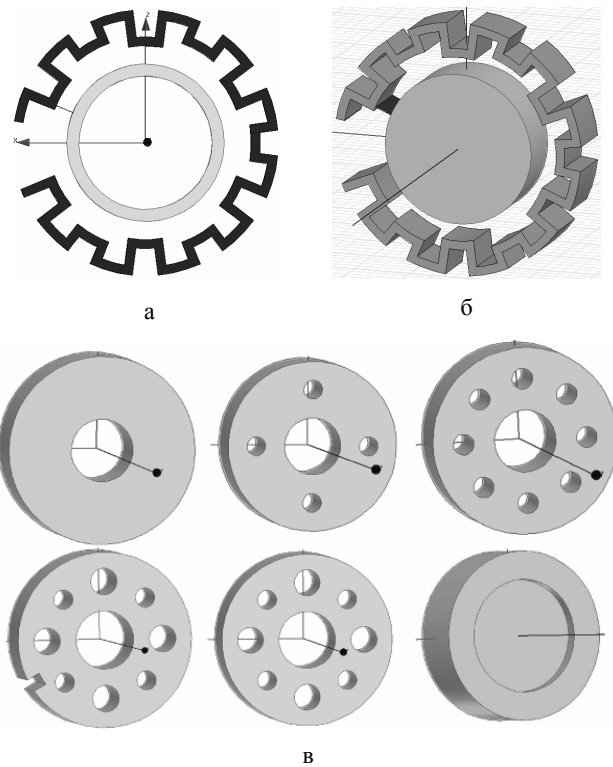


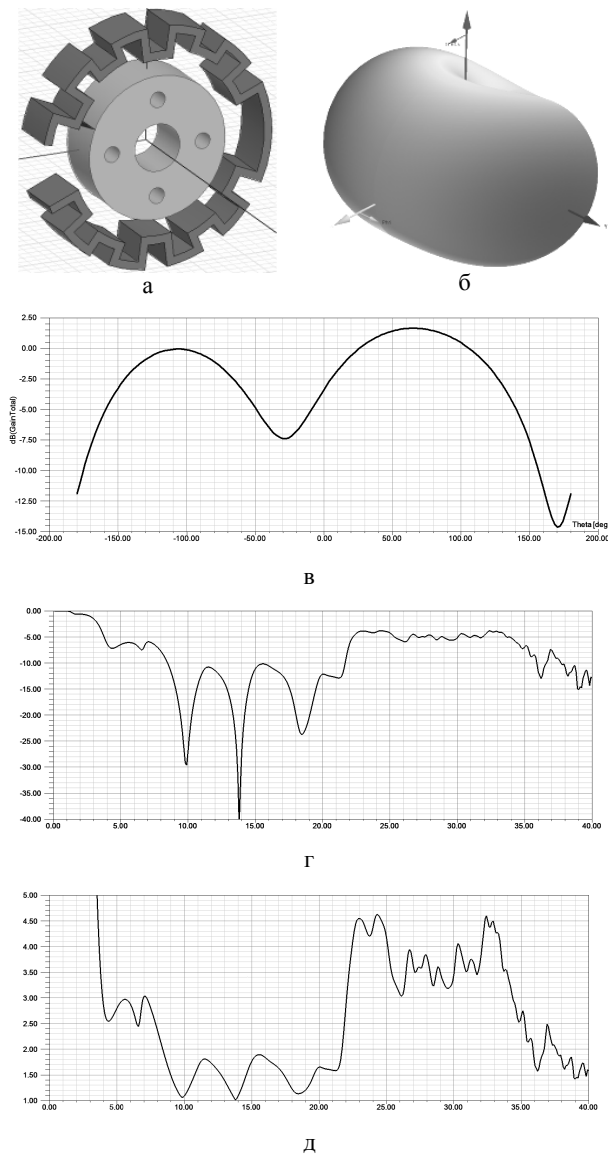
Рис. 16. Варіанти оптимізації моделі 2-кільцевого вібратора: а – приклад фракталізації внутрішнього периметру зовнішнього кільця; б – компоновка з «монолітним» внутрішнім кільцем; в – приклади трансформації внутрішнього кільця

#### Перспективи подальших досліджень.

Подальші дослідження запропонованого типу 2-кільцевих ЕМА слід зосередити на оптимізації їх просторово-частотних характеристик з метою максимізації смуги пропускання. В якості пріоритетів слід розглядати наступні напрями удосконалення геометрії антенних елементів:

- хаотичне розташування пазів у торцевих поверхнях стрічок, з різною їх глибиною та протяжністю уздовж стрічки та/або в шаховому порядку;
- застосування звивистої, гофрованої та фрактальної форми пазів, а також клиновидної, сідчастості, трикутної, гексагональної, сферичної форм або подібної до антени Вівальді;
- запровадження бічних пасивних сегментів у формі шаблонів, які використовувалися для формування пазів у торцевих поверхнях стрічок, з використанням таких сегментів з металу, діелектрика, з чергуванням металу та діелектрика;
- заповнення простору між кільцями (повністю або частково) діелектриком (у тому числі, з характеристиками, що змінюються у кутових сегментах за сідчастим та/або градієнтним законом);
- виріз у поверхнях стрічок множини щілин фрактальної форми;
- виконання пазів не на всю товщину стрічки або змінної товщини.

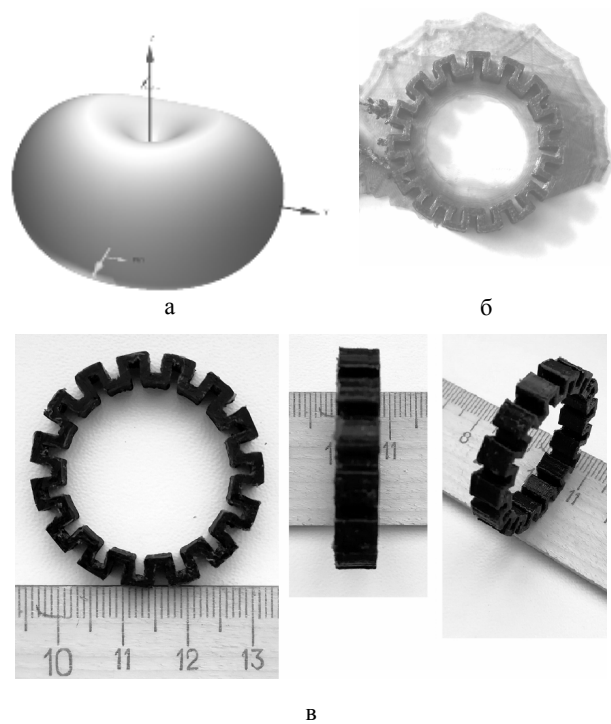
Ще одним напрямом є поєднання наведених модифікацій разом з багатовимірною фрактальною трансформацією, у тому числі, на основі кількох різних фракталів.



**Рис. 17.** Запропонована модель 2-кільцевого вібратора:  
а – компоновка; б – 3D BP; в – 2D BP;  
г – RL; д – VSWR

В інтересах створення широкосмугових метаматеріалів досить актуальною є розробка резонаторів з розрізними кільцями (Split Ring Resonator, SRR) на основі пари розрізних стрічок з торцевими пазами. При цьому, доцільно провести аналіз 3D-структур з урахуванням вищенаведених модифікацій кільцевих складових.

Враховуючі сучасні можливості використання адитивного виробництва складових антенних систем, в рамках роботи виконано 3D-друк шаблону синтезованого 24-сегментного квазіфрактального кільцевого вібратора (рис. 18). Його можливо використовувати для подальших етапів виготовлення антени (гальванічного наплення металу, виготовлення форм для лиття тощо).



**Рис. 18.** 24-сегментний квазіфрактальний кільцевий вібратор:  
а – BP; б – шаблон, який виготовлений на 3D-принтері «Prusa i3» (матеріал – PETG);  
в – модель після обробки

## Висновки

В цілому, результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Щоб виникли виражені резонанси, потрібно збільшувати кількість сегментів меандру в лінії.
2. Парна кількість сегментів дозволяє отримати більш ефективну структуру антени, ніж непарна.
3. Для парної кількості сегментів краще мати кратність їх числа 4, що дозволяє спостерігати повну симетрію форми кільцевого вібратора відносно усіх координат. У даному сенсі 24-сегментна конструкція краще за 30-сегментну (наприклад, дозволяє отримати більш широку смугу пропускання).

4. Максимальне розширення смуги пропускання дозволяє отримати порт живлення у вигляді повністю видаленої перемички сегменту. При цьому, він повинен розташовуватися на внутрішньому радіусі меандрової поверхні.

Наведені результати підтвердили теоретичні положення щодо доцільності розробки широкосмугових і багатодіапазонних антен на базі фрактального підходу. Векторне представлення фрактальної трансформації окремих сегментованих частин початкової геометричної форми значно розширює номенклатуру перспективних антенних систем неевклідової геометрії, а застосування параметричної оптимізації спрощує їх практичну реалізацію.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Устройства СВЧ и антенны. / Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И.– М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
2. Вишнеvский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. / Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.



3. Mandelbrot B. *Fractals: Forme, Chance and Dimension*. / Mandelbrot B. – San-Francisco: Freeman, 1977. – 365 p.
4. Long S.A. The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna. / Long S.A., McAllister M.W. and Chen L.C. // *IEEE Trans Antennas and Propagation*. May 1983, AP-31. – P. 406-412.
5. Birand M.T. and Gelsthorpe R.V. Experimental Millimetric Array Using Dielectric Resonators Fed by Means of Dielectric Waveguide. / Birand M.T. and Gelsthorpe R.V. – *Electronics Letters*. Sept. 1981, v.17. – P. 633-635.
6. McAllister M. Rectangular Dielectric Resonator Antennas. / McAllister M., Long S.A. and Conway G.L. – *Electronic Letters*. March 1983, EL-19. – P. 219-220.
7. Analysis of space-frequency characteristics of a quasi-fractal DRA based on a cube and truncated pyramid. / Sliusar I.I., Slyusar V.I., Polishchuk Y.V. and Stas E.I. // *Nauka i studia. – Przemysl*, 2018. – № 11. – P. 3-12.
8. Зимин В.В. Кольцевой одноволновой вибратор. / Зимин В.В. – RU Patent No. 2016117783 (A), 10.11.2017.
9. Matveev E.N. and Potapov A.A. Fractal Antennas for the New Class of Radio Systems: Keily Tree and Circular Monopole. / Matveev E.N. and Potapov A.A. // *Int. Radar Symp. (IRS-2009)*. – Hamburg, 2009. – P. 465-468.
10. The Quasi-Fractal Microstrip Antenna. / Mayboroda D.V., Pogarsky S.A., Poznyakov A.V., Sukhov V.N. and Shcherbatiuk E.V. // *IEEE 2018 9TH International Conference On Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*. – Odessa, 2018. – P. 349-352.
11. Synthesis of quasi-fractal hemispherical dielectric resonator antennas. / Sliusar I.I., Slyusar V.I., Voloshko S.V. and Smolyar V.G. // *IEEE 2018 5th International ScientificPractical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. – Kharkov, 2018. – P. 313-316.
12. Quasifractal dielectric resonator antenna based on the symmetric hexagon. / Tahan O.O., Sliusar I.I., Slyusar V.I. and Hrebilia R.E. // *Nauka i studia. – Przemysl*, 2018. – № 7. – P. 113-123.
13. Investigation of the overlapping effect of dielectric resonator antennas elements on the basis of a cylinder. / Kolisnyk A.V., Slyusar V.I., Sliusar I.I. and Samofal V.V. // *News of Science and Education*. – Sheffield, 2018. – № 3. – P. 68-74.
14. Семенов В.М. Квазіфрактальна діелектрична резонаторна антена на основі паралелепіпеда / Семенов В.М., Слюсар В.І., Слюсар І.І. // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава: ПолтНТУ, 2018. – № 2. – С. 167-171.
15. Antenna synthesis based on fractal approach and DRA technologies / I.I. Sliusar, V.I. Slyusar, S.V. Voloshko, L.N. Degtyareva // *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, July 2 – 6. – Lviv, 2019. – P. 29-34.
16. Synthesis of quasi-fractal ring antennas. / Sliusar I.I., Slyusar V.I., Voloshko S.V. Zinchenko A.O. and Degtyareva L.N. // *IEEE 2019 6th International ScientificPractical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. – Kyiv, 2019. – P. 741-744.
17. Банков С.Е. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. / Банков С.Е., Курушин А.А. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2009. – 256 с.
18. Assessment of Ultra-Wideband (UWB) Technology. OSD/DARPA Ultra-Wideband Radar Review Panel, Battelle Tactical Technology Center, Contract No. DAAH01-88-C-0131, ARPA Order 6049. – July 13, 1990.
19. Converged Solutions for Next Generation Optical Access / Sliusar I.I, Slyusar V.I., Voloshko S.V., Smolyar V.G. // *2015 Second International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PIC S&T' 2015): Conference Proceedings; Kharkiv, Ukraine, October 13-15. – Kharkiv, 2015. – P. 149-152.*

Received (Надійшла) 25.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2020

### Broadband antennas based on ring geometry

I. Sliusar, V. Slyusar, S. Zub, D. Teleshun

**Abstract.** Variants of models of quasi-fractal ring structures are considered in the work. For their synthesis a vector description of the fractal transformation of individual segments of the initial geometric shape is proposed. The combination of the decomposition of the geometric shape and multidimensional fractal approach allows to simplify the synthesis of fractal 3D structures and/or to use several types of fractals, including with a different number of iterations. This approach allows achieving broadband and multi-band antenna systems. The influence of the segmentation level and the power scheme on the spatial-frequency characteristics of the antenna was investigated. Due to the complexity of describing the interaction radio waves with antennas of non-Euclidean geometry for their synthesis and analysis taken methods of numerical simulation. A number of assumptions are introduced. Evaluation and comparison of antennas held by the following spatial and frequency characteristics: amplitude-frequency response, beam pattern and voltage standing wave ratio (VSWR). To estimate the bandwidth was used the definition of the band by the criterion of return loss less than -10 dB and  $(VSWR) \leq 2$ . The «fractional bandwidth» parameter was used to compare antennas with different bandwidth limits. The search for the optimal power supply scheme was carried out on the basis of the choice of the port location of the antenna power supply circuit, as well as the aperture of the «opening» of the outer ring. The most successful arrangements are based on an even number of segments, for example, 24 segments with an angular size of 15 deg. In addition, the paper considers several variants of the model of 2-rings quasi-fractal vibrators. One group is synthesized by fractal transformation of the tangential component of the outer perimeter of the quasi-fractal ring in a checkerboard pattern, and the other, respectively, by the inner perimeter of the outer ring. To maximize the potential of the synthesized configurations of the antenna components, options based on the implementation of the «monolithic» structure of the inner ring are proposed. In general, the transition from single-ring to 2-rings vibrator geometry has significantly reduced the lower bandwidth bound. The most successful models provide broadband at the level of  $\delta f = 0.9$  and the minimum return loss at the level of -40 dB. The obtained estimates of fractional bandwidth indicate the prospects of the proposed approach for the implementation of antenna systems with a high level of broadband.

**Keywords:** antenna, beam pattern, fractal, quasi-fractal, return loss, voltage standing wave ratio (VSWR).

A. Shyshatskyi<sup>1</sup>, O. Cherniak<sup>2</sup>, A. Lyashenko<sup>3</sup>, S. Paniuk<sup>4</sup>,  
A. Doroshets<sup>4</sup>, V. Savenko<sup>4</sup>, V. Mazurenko<sup>4</sup>, S. Hryhorak<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup> Military unit A0515, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> Military institute of telecommunications and information named after Heroes of Krut, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup> National Defence University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Kyiv, Ukraine

## DEVELOPMENT OF THEORETICAL PROVISIONS OF TRANSMISSION OF DISCRETE MESSAGES OF MILITARY RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS

**Abstract.** Modern military radio systems operate in the complex conditions of the electronic environment, due to the limited frequency range, the influence of deliberate interference and signal fading. One of the ways to improve the effectiveness of military radio communication systems is to develop indicators (methods, techniques) for evaluating the effectiveness of military radio communication systems. The analysis found that known approaches to evaluating the performance of military radio communications systems are based on the use of bit error probability in a channel, which is a rather rough indicator of channel estimation. This necessitates the development of theoretical provisions for the transmission of discrete messages to military radio systems. In order to improve the known theoretical provisions for the transmission of discrete messages of military radio communication systems, the authors of the article developed indicators for assessing the quality of functioning of military radio communication systems that operate in complex conditions of electronic conditions. In the course of the study, the authors of the research substantiated two indicators of link quality in the fading channel: the probability of correctly receiving a message of finite duration and the likelihood of a link of finite duration without breaks. The first metric is the overall metric (communication) quality of the communication, and the second metric is the quality of the channel in the session of the final duration. During the research, the authors used the basic principles of communication theory, theories of insecurity, the theory of transmission of discrete messages, etc. The proposed results can be used to evaluate the status of radio channels when they are exposed to a variety of origins and signal fading. The practical significance of these results is that they can be used to upgrade existing radios or to develop new ones by developing appropriate software.

**Keywords:** discrete messages, radio communication, communication theory, signal fading, interference.

### Introduction

Modern military radio systems operate in the complex conditions of the electronic environment, due to the limited frequency range, the influence of deliberate interference and signal fading. One of the ways to improve the effectiveness of military radio communication systems is to develop indicators (methods, techniques) for evaluating the effectiveness of military radio communication systems. This necessitates the development of theoretical provisions for the transmission of discrete messages to military radio systems.

In the general case, signal fading is present in the radio channels due to the multipath propagation of the electromagnetic wave [1, 2]. As the range increases, their depth also increases. The channel becomes first Raysian, and on the border of direct visibility, it is Rayleigh [3]. It is noted that the robustness of the radio communication system for individual channel implementations may differ significantly from the average error probability, so it is averaged across all implementations.

This leads to a rather rough description of the physical channel [4, 5]. In this case, the actual channel metrics are significantly different from the estimates.

All of this leads to the search for new approaches to the description of fading channels.

In view of the foregoing, *the purpose of the article* is to develop theoretical provisions for the transmission of discrete messages to military radio systems over signal fading channels.

### Presentation of the main material

While transmitting discrete messages in a channel with constant parameters and white noise, the primary indicator of radio quality is the average probability of a  $P_{ber}$  bit error. The second indicator is the probability of correct reception  $P_{rec}$  of a message (code group) of  $n$  characters. In a channel with constant parameters  $P_{rec}$  in the absence of redundancy, it is calculated by the formula [1]

$$P_{rec} = (1 - P_{ber})^n. \quad (1)$$

We have the other situation when the channel has a random fading signal at the input of the receiver (demodulator). In this case, the average fading probability of a  $P_{ber}$  bit error, the probability of correctly receiving a  $P_{rec}$  message, and the reliability of  $H$ . The indicator  $\bar{P}_{rec}$  can be interpreted ambiguously.

At the link layer, character transfer protocols with punctuation are used to reduce the effect of fading on error grouping to ensure their correlation in the message (code group). The calculations show that the transmission speed is significantly reduced.

In addition, the correct reception of the message of a big payoff is not achieved, since the calculation uses the average for all implementations the probability of a  $\bar{P}_{ber}$  bit error, which is usually 2-3 orders of magnitude greater than the probability of a bit error in the channel without fading is  $P_{ber}$ .

The article [5] gives an example of calculating the probability of receiving a message correctly in 200

characters and shows that the transmission rate in the channel decreases 7.5 times.

However, in the monograph [1], examples of calculations by the standard method are given. These calculations show that the code groups (messages) without interleaving when averaged over a one-dimensional probabilistic model of the fading process have higher correctness of message reception than when using interleave and  $P_{ber}$  indicator.

Thus, in these examples, it is shown [1] that in order to achieve the same probability of mistakenly receiving a 100-bit code combination, for example, in Rayleigh fading using the indicator  $\bar{P}_{ber}$ , the average transmitted signal power needs to be increased 550 times with respect to channel conditions without fading, but without the use of alternation, it is enough to increase only 50 times.

In the article [1], it was concluded: "... if the channels are compared with the probability of correctly receiving relatively long code combinations, the presence of slow fading does not impair the quality of the channel, as compared with the likelihood of receiving a single character correctly". Based on the above, we can conclude that there is ambiguity in the results of calculations when the difference is more than an order of magnitude. It should be noted that the length of the code group is determined by the number of characters, and does not indicate its duration and effect on the quality of reception of messages, for example, the length of the correlation interval.

However, the fading of the signal in the physical channel leads to errors in the reception of symbols at the channel level (in the discrete channel), which can be grouped within the code group (message). Known methods that are based on the models of Hilbert, Elliot-Hilbert, Fritschman and others are used for the statistical description of these groups [6-10].

Formalized error grouping models have nothing to do with signal fading in a physical channel. Parameters of the model of error grouping are usually adjusted by selection at a mode of test messages for a given time [6]. Thus, there is no relationship between the fading models in the physical channel and the error grouping patterns in the message in the discrete digital channel after detection.

In addition, the abovementioned works show that the averaged over the one-dimensional probability of fading, the bit error probability is a monotonic function of signal/noise ratio  $\bar{h}^2 = E/N_0$ , where  $E$  is the energy of the information symbol;  $N_0$  is the one-way spectral noise density in the channel. And this view is used while calculating channel settings and radio quality in fading conditions.

However, in the article [1], it is shown that the local account of even a very small change in the signal level due to fading over the duration of the information symbol leads to a constant value  $\bar{P}_{ber}$  after reaching a  $\bar{h}^2$  certain value, so the  $\bar{P}_{ber}(\bar{h}^2)$  function ceases to be monotonic and reaches "saturation".

The specific value  $\bar{P}_{ber}$  of "saturation" is determined by the type of function of the correlation coefficient of the fading process and the duration of the information symbol.

In these conditions, the graphs confirm that increasing the average level  $\bar{h}^2$  or power of the signal does not reduce the probability of a  $\bar{P}_{ber}$  bit error.

As a result of these theoretical contradictions, the following interpretation of the mentioned "saturation" phenomenon is possible with regard to the rate of change of signal level.

The kind of  $\bar{h}^2$  curve that corresponds to the rate of change of the signal level also changes, resulting in a change in the order of  $\bar{P}_{ber}(\bar{h}^2)$  magnitude, as if jumping to specific curves in the family of these curves  $\bar{P}_{ber}(\bar{h}^2)$ , even at constancy  $\bar{h}^2$ .

The abovementioned articles have adopted the characteristic of a communication channel at the physical layer - the reliability of communication, which shows the percentage of time when the signal level at the demodulator input is above the threshold and the communication quality is not worse than necessary. The reliability of communication is determined by the one-dimensional probability of the fading process. At the channel level of message transmission, this characteristic is uninformative and does not reflect the actual duration of interruptions in the reception of messages caused, for example, disruption of synchronization, and the time spent on its recovery [8].

On the other hand, for example, in the article [7], it is shown that different types of formalization of calculations are possible while calculating lines of radio relay communication, which results in a significant difference in the obtained results.

Thus, in the presence of the signal fading in the physical channel classical theory of transmission of discrete messages has limited application, and the listed theoretical contradictions are caused by inconsistencies of the accepted one-dimensional probabilistic model.

First of all, the discrepancy of the accepted one-dimensional probabilistic model is its one-dimensionality. This model does not take into account the dynamics of the random fading process, its characteristics such as the autocorrelation function and the duration of the correlation interval, as well as other central and initial moments of the random process. When averaged over a one-dimensional probabilistic measure, the condition of so-called "local stationarity" is used, when the signal level (or transmission coefficient) remains unchanged for some time interval. At another interval, the channel is again considered constant, but maybe with different characteristics. The influence of channel behavior in intermediate states is not taken into account, it is believed that the signal level changes gradually.

Averaging over one-dimensional probability can be interpreted as follows. There are many channels

(sessions) with constant but random gear ratios. In each communication session, such a constant channel with a random but fixed value of the transmission rate (signal level) is selected at random.

On many of these channels, we can see the average values of the transmission coefficient, the  $\bar{h}^2$  signal/noise ratio, the probability of the  $\bar{P}_{ber}$  bit error, etc. At the same time, the relation to the actual operating conditions is the farthest, the dynamic characteristics of the fading process are not taken into account.

In order to exclude approaches to solving theoretical contradictions, it is proposed to introduce two indicators of link quality in a fading channel: the probability of receiving a  $P_{rec\ end}^*$  correct finite duration message and the probability of a termination link without  $P_{without\ pre}$  interruptions.

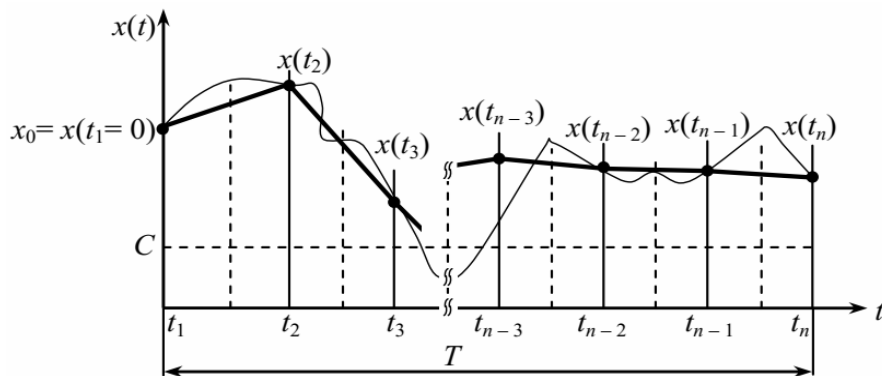


Fig. 1. Approximation of the continuous realization of a random process by a broken line with “vertices” in time intervals within the time interval  $T$  is observed

In accordance with the abovementioned indications, the probability of correctly receiving a message with a duration of  $T$  in the channel with a fading signal is determined by the expression

$$P_{rec\ end}^* \geq P_{rec\ end} P_{without\ pre} \tag{2}$$

where  $P_{rec\ end}$  is the probability of correctly receiving messages of finite duration without signal fading.

The probability of unbroken communication  $P_{without\ pre}$  is determined by the formula [8]

$$P_{without\ pre} = \int_{\vec{u}_{thr}}^{\infty} \dots \int w(\vec{u}) d\vec{u} \tag{3}$$

In the formula (3), the following notation is introduced:

$\vec{u}$  is the value of the vector random value of the signal level at the intervals of the time interval  $T$  (the number of sections determines the dimension of the vector  $\vec{u}$ );

$\vec{u}_{thr}$  is the vector of signal level thresholds.

From the general formula below, one can obtain multivariate Rayleigh random distribution laws:

$$w_n(r_1, r_2, \dots, r_n; \tau) = \prod_{i=1}^n r_i / \sigma^{2n} (1 - R_0^2)^{n-1} \times$$

The first metric is the overall metric quality of the communication, and the second metric is the quality of the channel in the session of the final duration.

The probability of  $P_{without\ pre}$  non-interruption communication at a finite time interval  $T$  indicates the probability that during this time the signal level does not fall below the set threshold. This interval, including, can be the duration of the received message (code group).

The introduction of such an indicator requires the use of a probabilistic model of the random fading process in the form of a reduced multidimensional probabilistic measure  $w(\vec{u})$ .

For this purpose, it is proposed to approximate the continuous or even non-differentiated realization of a random process with a broken line with “vertices” at time intervals within the time interval  $T$  (Fig. 1) [8].

$$\times \exp \left\{ \frac{r_1^2 + (1 + R_0^2) \sum_{i=2}^{n-1} r_i^2 + r_n^2}{2\sigma^2 (1 - R_0^2)} \right\} \left\{ \prod_{i=1}^{n-1} I_0 \left[ \frac{R_0 r_i r_{i+1}}{\sigma^2 (1 - R_0^2)} \right] \right\},$$

where  $r_n$  is the value of a random variable,  $R_0$  is the random process correlation function.

From the abovementioned, you can draw the following conclusions:

1. The smaller the ratio of the correlation interval to the interval of the communication session, the less the likelihood of communication without interruptions, which is not shown in the one-dimensional case (straight), since the calculations are performed on the average of the entire implementation (one-dimensional distribution functions), do not take into account dynamic characteristics (correlation interval, transmission time limit). This phenomenon shows that when the correlation interval ratio is relatively low, the average error probability does not fully characterize the quality of the reception.

2. As the correlation interval increases with the transmission of the time interval, the message graphs, that are constructed on multidimensional distribution functions, asymptotically seek a one-dimensional distribution function.

This shows the consistency of the proposed approach with respect to the existing approach of calculating the probability of receiving a message.

## Conclusions

The theory of transmitting discrete messages in a fading channel requires refinement. In order to describe the process of transmitting discrete messages in a radio channel under freezing conditions, the probability of correctly receiving messages in the absence and in the presence of organized interference is an important characteristic. The traditional link reliability setting is not identical to this probability. While determining, it requires a different approach, namely, introducing an additional characteristic of the radio channel in the presence of fading, such a characteristic may be the probability of uninterrupted communication while transmitting a discrete message of finite duration.

Using the suggested link quality metric on a fading channel allows you to:

- without losing the bandwidth of the channel to ensure with high accuracy, while maintaining the required quality of the channel in real-time;
- predict the probability of receiving the message correctly when using the necessary measures to set the modes of transmission of discrete messages.

The fading channel quality indicators proposed in the article are used to detect and disperse signals against the background of noise, to calculate the noise and communication reliability and to evaluate the propagation characteristics of radio waves.

Future research will focus on developing methods for improving the immunity of military radio systems.

## REFERENCES

1. Shyshatskiy, A.V., Bashkirov, O.M. and Kostina, O.M (2015). "Development of integrated systems and data for Armed Forces", Arms and military equipment, No 1(5), pp. 35-40. available at : <http://journals.uran.ua/index.php/2414-0651/issue/view/1%285%29%202015> (last accessed January 25, 2020).
2. Korneyko, O. V., Kuvshinov, O. V. and Lezhniuk, O. P(2010). "The basics of the theory of telecommunication", Kyiv, 786 p.
3. Varakin, L.E.(1970). "Theory of complex signals". Mocsow . Radio, 304 p.
4. Sklyar, B (2003). "Digital communication. Theoretical foundations and practical application", Moscow, Williams.
5. Zhuk, O.G., Shyshatskiy, A.V., Zhuk, P.V. and Zhyvotovskiy, R.M (2017). "Methodological substances of management of the radio-resource managing systems of military radio communication", Information Processing Systems, Vol. 5(151), pp. 16-25. <https://doi.org/10.30748/soi.2017.151.02> (last accessed January 25, 2020).
6. Shyshatskiy, A. V., Olshanskiy, V. V. and Zhyvotovskiy, R. M(2016). "Algorithm of the choosing working frequencies for facilities of military radio communication in the conditions of intentional interference". Systems of armament and military equipment. No. 2. - P. 62-66. available at: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/16881>.
7. Romanenko, I. O., Shyshatskiy, A.V., Zhyvotovskiy, R. M. and Petruk, S.M (2017). "The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems". Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. No 1. pp. 97-100.
8. Sova O.Ya., Romanuk, V.A. Zuk, P.V. and Umanec, Ya. L(2012). "Synthesis methodology of smart nodes management systems of perspective mobile radio networks with dynamic topology". Collection of scientific works of HUPS. No 3. pp. 51 – 60.
9. Sova, O. Ya., Minochkin, D.A., Romanyuk, V.A. and Zhuk, P.V(2015). "Model of organization of information resources of intelligent management systems of nodes of mobile radio networks of the class MANET". Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. No. 2(19). pp. 51-57.
10. Golubtsov, S. G. and Leonovich G.A (2009). "Methodology for assessing the effectiveness of the functioning of the field backbone communication network of an association by a comprehensive accessibility indicator". Science and military security. No. 3. pp. 23-29.

Надійшла (received) 08.01.2020

Прийнята до друку (accepted for publication) 25.03.2020

## Розвиток теоретичних положень передачі дискретних повідомлень систем військового радіозв'язку

А. В. Шишацький, О. Р. Черняк, Г. Т. Ляшенко, С. А. Панюк, А. В. Дорошешь,  
В. В. Савенко, В. М. Мазуренко, С. В. Григорак

**Анотація.** Сучасні системи військового радіозв'язку функціонують в складних умовах радіоелектронної обстановки, що обумовлені обмеженістю частотного діапазону, впливом навмисних завад та завмирань сигналу. Одним з напрямків підвищення ефективності систем військового радіозв'язку є розвиток показників (методів, методик) оцінювання ефективності систем військового радіозв'язку. Під час проведеного аналізу встановлено, що відомі підходи з оцінювання ефективності систем військового радіозв'язку засновані на використанні ймовірності бітової помилки в каналі, що є досить грубим показником оцінки каналів. Зазначене обумовлює необхідність проведення розвитку теоретичних положень передачі дискретних повідомлень систем військового радіозв'язку. З метою удосконалення відомих теоретичних положень передачі дискретних повідомлень систем військового радіозв'язку авторами статті проведено розробку показників оцінки якості функціонування систем військового радіозв'язку, що функціонують в складних умовах радіоелектронної обстановки. В ході проведення дослідження авторами дослідження було обґрунтовано два показника якості зв'язку в каналі із завмираннями: ймовірність правильного прийому повідомлення кінцевої тривалості та ймовірність зв'язку кінцевої тривалості без обривів. Перший показник є загальним показником якості (зв'язку) передачі інформації, а другий - показником якості каналу на сеансі зв'язку кінцевої тривалості. В ході проведеного дослідження авторами були використані основні положення теорії зв'язку, теорії завадозахищеності, теорії передачі дискретних повідомлень та інш. Запропоновані результати можуть бути використані під час оцінюванні стану каналів радіозв'язку при впливі завад різноманітного походження та завмирань сигналу. Практична значимість зазначених результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані при модернізації існуючих засобів радіозв'язку або під час розробки нових засобів шляхом розробки відповідного програмного забезпечення.

**Ключові слова:** дискретні повідомлення, система радіозв'язку, теорія зв'язку, завмирання сигналу, завади.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Артемиченко Б. І.	148	Корсун Р. О.	90	Онишків П. А.	75
Багіров С.	135	Криволапов І. Ю.	70	Очеретенко С. В.	51
Багрій М. М.	131	Криховецький Г. Я.	164	Панова О. В.	127
Байрамов А. А.	144	Кулаков І. П.	3	Панюк С. А.	180
Бакуменко Б. В.	148	Кучук Г. А.	70	Пашаєв А. Б.	144
Балакірева С. М.	3	Лазуренко Б. О.	169	Прончаков Ю. Л.	40
Блиндюк В. С.	36	Ларін Д. О.	44	Раскін Л. Г.	90
Бойко А. В.	12	Левченко Л. О.	110	Рігус Д. А.	122
Бреславець Ю.	56	Лемешко О. В.	152	Руденко В. М.	12
Гаєвський С. В.	3	Лещинська І. О.	105	Руккас К. М.	95
Гайтан О. М.	60	Лещинський В. О.	105	Сабзієв Е. Н.	144
Гейко Г. В.	36	Леві Л. І.	27	Савенко В. В.	180
Гиренко І. М.	164	Литвиненко Я. В.	75	Савицька Т. М.	122
Глива В. А.	110	Ліщенко В. М.	160	Сакович Л. М.	164
Горбов О. М.	31	Лукова-Чуйко Н. В.	70	Сахно Т. В.	135
Григорак С. В.	180	Лупенко С. А.	75	Серков О. А.	169
Губа С. М.	31	Любий Є. В.	44	Сіра О. В.	90
Данова К. В.	114	Ляшенко Г. Т.	180	Слюсар В. І.	173
Дорошець А. В.	180	Мазуренко В. М.	180	Слюсарь І. І.	173
Євдокименко М. О.	152	Макогон О. А.	31	Смірнова Т. В.	101
Єременко О. С.	152	Мартиненко О. В.	31	Сорока М. Ю.	17
Жолткевич Г. Г.	95	Матвеева І. В.	110	Сухоруков М. В.	148
Зозуля А. М.	75	Машенко С. І.	31	Телешун Д. Ю.	173
Зуб С. В.	173	Мезенцев М. В.	36	Тихенко О. М.	118
Іманов Р. Р.	144	Мелешко Є. В.	85	Триснюк В. М.	75
Касаткіна Н. В.	118	Мельник Д. М.	148	Трубчанінова К. А.	169
Кислиця С. Г.	135	Мирошниченко Ю. В.	164	Федорович О. Є.	40
Кічата Н. М.	122	Мікосянчик О. О.	122	Фурсенко О. М.	118
Кічата Н. М.	110	Міхав В. В.	85	Халмурадов Б. Д.	131
Коваленко А. А.	70	Міщенко Т. Ю.	12	Чалий С. Ф.	105
Ковальов І. О.	31	Мусаїрова Ю. Д.	21	Черняк О. Р.	180
Кожушко Г. М.	135	Назаров О. С.	60	Шишацький А. В.	180
Колесник А. В.	12	Неме М.	56	Шпак С. В.	135
Кононов В. Б.	21	Носков В. І.	36	Якименко М. С.	85
Кононова О. А.	21	Огульчанська Д. С.	51		

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 2 (60)

Відповідальна за випуск *К. С. Козелкова*Технічний редактор *Т. В. Уварова*Коректор *О. В. Морозова*Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*Оформлення обкладинки *І. В. Львіна*

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

Підписано до друку 29.05.2020. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 24,0. Тираж 150 прим. Зам. 529-20

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (066) 706-18-30

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.

Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.

Запис № 2480000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34

e-mail: [bookfabrik@mail.ua](mailto:bookfabrik@mail.ua)