



# СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

5(57) ' 2019

Заснований  
у 2007 році

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

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

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

**Телефон:** +38 (066) 706-18-30  
(консультації, прийом статей).

**E-mail:**  
kozelnkova@ukr.net

**Інформаційний сайт:**  
<http://www.pntu.edu.ua>

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

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

### **Голова:**

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

### **Заступник голови:**

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

### **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., Україна)

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

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

КОШОВИЙ Микола Дмитрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

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

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

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

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

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

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

МОРГУН Олександр Андрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ПОПОВ Валентин Іванович (д-р фіз.мат. наук, проф., Латвія)

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

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

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

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

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

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

### **Відповідальний секретар:**

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

*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 (СС), Google Scholar (США), Academic Resource Index (СС), Scientific Indexed Service (США).*

*Затверджений до друку вченою радою Полтавського національного технічного університету  
імені Юрія Кондратюка (протокол від 30 жовтня 2019 року № 4)*

*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 № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.*

# З М І С Т

## НАВІГАЦІЯ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

<i>Рагулін С. В., Сироїжка І. О.</i> Аналіз показників та критеріїв ефективності системи технічної експлуатації радіоелектронних навігаційних систем .....	3
--	---

## УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Аркушенко П. Л., Вервейко О. І., Яковлев М. Ю., Флорін О. П.</i> Визначення особливостей стандартів США щодо метрологічного забезпечення випробувань озброєння та військової техніки .....	7
<i>Главчев Д. М.</i> Програмні компоненти бортової комп'ютерної системи дизель-потяга .....	11
<i>Заповський М. Й., Мезенцев М. В., Скородолов В. В.</i> Математична модель для синтезу управління електроприводом змінного струму .....	16
<i>Кононов В. Б., Кушнерук Ю. І., Назаренко А. А.</i> Дослідження проектування принципової схеми пристрою тестування інтегральних мікросхем .....	22
<i>Науменко А. М., Бабич О. О., Короткий Е. О.</i> Аналіз методів організації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем управління об'єктів .....	25

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Бреус Р. В.</i> Синтез двоохрозрядних двооперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування шляхом перетворення другого операнда .....	29
<i>Нафііак А., Shefer O., Klochko A., Harlamov I.</i> Professional competence of future specialists in information and communication technologies: QR coding in student learning .....	33
<i>Golovko G., Nikiforova K.</i> Information search systems usage in Poltava National technical Yuri Kondratyuk university chemistry department information system .....	36
<i>Goroshko A., Derkach T., Dmitrenko T., Dmitrenko A.</i> Assessment of socio-economic value and efficiency of author's software and hardware system .....	40
<i>Кобилін О. А., Вискребенцева С. О., Петрова Р. В.</i> Обробка даних, що містять пропуски в задачах кластеризації .....	45
<i>Кучук Н. Г., Зиков І. С., Панченко В. І.</i> Метод розгалуження запитів до сховищ даних систем, що мають гіперконвергентну інфраструктуру .....	51
<i>Лада Н. В., Козловська С. Г., Зажома В. М., Висоцький С. В.</i> Синтез апаратних зособів реалізації груп симетричних двооперандних операцій потокового шифрування .....	55
<i>Маковейчук О. М.</i> Науково-прикладні основи побудови стійких маркерів доповненої реальності .....	59
<i>Мелешко Є. В., Хох В. Д., Улічев О. С.</i> Дослідження відомих моделей атак на рекомендаційні системи з колаборативною фільтрацією .....	67
<i>Milov O., Milevskiy S., Pohasii S., Rzaev K.</i> Procedural basis of cybersecurity systems .....	72
<i>Міхав В. В.</i> Програмне забезпечення для моделювання мереж репутації користувачів соціальних веб-ресурсів на основі бінарних діаграм рішень .....	78
<i>Suhak S., Shabanova-Kushnarenko L., Siruk M., Bihun N., Mishchenko A.</i> Data processing center as the basis of information security of the defense ministry of Ukraine .....	84
<i>Чмихова О. В., Щанов П. Ф., Куліченко В. В., Горбуліч О. В.</i> Параметрична ідентифікація діабетичних станів при використанні поліноміальних моделей динаміки глікемії .....	88
<i>Yakovliev M., Filonenko K.</i> Effects of loading speed on the site traffic conversion .....	92

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Машков О. А., Мамчур Ю. В., Жукаускас С. В., Нігородова С. А.</i> Застосування концепцій зворотних задач динаміки в мобільних комплексах екологічного моніторингу для стабілізації руху при виникненні нештатних ситуацій ...	95
<i>Панова О. В., Тихенко О. М., Ніколаєв К. Д., Ходаковський О. В., Сапельнікова О. Ю.</i> Дослідження захисних властивостей металевих електромагнітних екранів та визначення умов їх максимальної ефективності .....	103

## ЗВ'ЯЗОК ТА РАДІОЛОКАЦІЯ

<i>Бахмат М. В., Бударецький Ю. І., Лаврут Т. В., Бондарев В. В.</i> Теоретичні та експериментальні дослідження спектру доплерівського сигналу на виході приймально-передавального модулю радіолокаційного вимірювача параметрів руху .....	108
<i>Казаков Є. Л., Казаков О. Є., Решетнік В. М.</i> Експериментальне дослідження поляризаційно-розсіюючих властивостей радіолокаційної цілі конічної форми, покритої радіопоглинаючим матеріалом .....	113
<i>Карлов В. Д., Кузнецов О. Л., Артеменко А. М., Карлов А. Д.</i> Точність оптимального вимірювання радіальної швидкості цілі при врахуванні флукутацій початкових фаз радіоімпульсів пачки .....	118

<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	124
----------------------------------	-----

# Навігація та геоінформаційні системи

УДК 629.052.3:621.396.6:681.518.5

doi: 10.26906/SUNZ.2019.5.003

С. В. Рагулін, І. О. Сироїжка

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

## АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ТА КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Зростання складності радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден і розширення кола виконуваних ними функцій призвели до того, що для управління технічним станом радіоелектронних навігаційних систем підприємства змушені виконувати значний обсяг робіт з технічного обслуговування і ремонту. Сучасні повітряні судна оснащуються цифровими пілотажно-навігаційними комплексами нового покоління, в яких всі системи мають вбудовані системи контролю і конструктивно виконуються у вигляді ряду легкозамінного блоку. Експлуатаційні витрати на технічне обслуговування і ремонт радіоелектронних навігаційних систем в даний час досягають 30-40% від загальної вартості технічного обслуговування і ремонту повітряного судна, тому актуальним є питання підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту за рахунок зниження експлуатаційних витрат при збереженні льотної придатності та конкурентоспроможності повітряного судна.

**Ключові слова:** авіоніка, надійність, радіоелектронні системи, технічне обслуговування і ремонт.

### Вступ

Показники та критерії ефективності системи технічного обслуговування і ремонту. Відомі показники ефективності системи технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) можна розділити на технічні (ймовірні) і техніко-економічні (вартісні або часові).

До технічних відносяться комплексні показники надійності: коефіцієнт готовності (КГ), стаціонарний коефіцієнт готовності; коефіцієнт оперативної готовності (КОГ); коефіцієнт технічного використання (КТВ). До техніко-економічних відносяться: повні експлуатаційні витрати; питомі середні витрати; питома середня прибуток тощо.

Згідно ДСТУ 2860-94 [2], коефіцієнт готовності – це ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається.

Стаціонарний коефіцієнт готовності – це значення КГ, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середній час відновлення залишаються постійними.

Коефіцієнт оперативної готовності – ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкту за призначенням не передбачається і, починаючи з цього моменту, буде виконувати необхідну функцію протягом заданого інтервалу часу.

Коефіцієнт технічного використання – це відношення математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані і в простоях, зумовлених технічним

обслуговуванням і ремонтом за той же період.

Найважливішим показником для оцінки ефективності ТО, який використовується практично всіма провідними авіакомпаніями світу, є середнє напрацювання на позаплановий ремонт (СЧНПР)

У роботах [1, 3], стандартизуючих цей показник, він визначається як відношення напрацювання системи до кількості позапланових знімачів за аналізований період, тобто для його розрахунку необхідно мати певний обсяг статистичної інформації.

В даний час відсутні аналітичні вирази для розрахунку показника СЧНПР. Цей показник розраховується усіма авіакомпаніями тільки за результатами обробки статистичних даних відмов систем за визначений період. На етапі проектування використовуються дані по значенням СЧНПР для аналогічних систем раніше розроблених ПС.

Як показує аналіз опублікованих робіт [4, 5], в більшості з них розглядається превентивне ТО, яке у вітчизняних джерелах зазвичай називається планово-попереджувальне або профілактичне.

У ряді робіт ТО включає КР одноблокової системи в дискретні моменти часу і заміну на нову систему в разі відмови. Така стратегія ТО використовується для сучасних систем авіоніки, в яких тестування здійснюється за допомогою ВСК, а забраковані ЛБ замінюються запасними з ОФ.

Як показав аналіз літератури [4-8], в більшості відомих моделей ТО одноблочних систем не враховуються показники достовірності КР.

У джерелах використовувани показники достовірності не враховують особливості багаторазового КР систем, які полягають в тому, що умовні ймовірності правильних і помилкових рішень в даний момент залежать від результатів КР в попередні моменти часу.

У роботах [9, 10] наведені вирази для таких показників як коефіцієнт технічного використання і

коефіцієнт готовності, які враховують особливості багаторазового КР:

$$K_{TB} = \frac{(1-\beta)[1-\exp(-\lambda\tau)]}{\lambda\{(\tau+t_{KP})[1-\beta\exp(-\lambda\tau)]+(1-\beta)[t_{XB}\alpha\exp(-\lambda\tau)+t_{PB}\exp(-\lambda\tau)]\}}; \quad (1)$$

$$K_G = \frac{(1-\beta)[1-\exp(-\lambda\tau)]}{\lambda\{\tau[1-\beta\exp(-\lambda\tau)]+(1-\beta)[t_{XB}\alpha\exp(-\lambda\tau)+t_{PB}\exp(-\lambda\tau)]\}}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – умовна ймовірність "хибної відмови" при КР ЛБ на стоянці ПС у базовому аеропорту;

$\beta$  – умовна ймовірність "невиявленої відмови" при КР ЛБ на стоянці ПС у базовому аеропорту;

$\lambda$  – інтенсивність раптових відмов ЛБ;

$\tau$  – середній наліт ПС між двома сусідніми стоянками в базовому аеропорту;

$t_{кр}$  – середня тривалість КР;

$t_{XB}$  – середня тривалість "хибного відновлення" ЛБ на ЗВ або в центрі ТОіР;

$t_{ПВ}$  – середня тривалість "правильного відновлення" ЛБ на ЗВ або в центрі ТОіР.

При виведенні даних виразів експлуатація ЛБ розглядалася на інтервалі напрацювання  $(0, T_p)$ , де  $T_p$  – призначений ресурс, і було прийнято припущення про нескінченність інтервалу планування ТО, тобто  $T_p = \infty$ .

Крім того, показники (1) і (2) не враховують зовнішній прояв відмов і структуру резервування РЕНС з точки зору надійності.

У деяких роботах [6] розглядаються показники надійності на кінцевому інтервалі часу експлуатації, однак вони не враховують вплив показників достовірності КР.

У розглянутих вище роботах не розглядаються показники безвідмовності періодично контрольованих систем, що впливають на безпеку польотів. В якості такого показника безвідмовності в статті пропонується використовувати апостеріорну ймовірність безвідмовної роботи періодично контрольованої невідновлювальної одноблокової системи. Однак цей показник можна використовувати тільки для невідновлювальних РЕНС.

У роботі [10] запропонований показник безвідмовності невідновлювальної одноблокової системи у вигляді експлуатаційної ймовірності безвідмовної роботи (ЕЙБР). Під ЕЙБР розуміється ймовірність безвідмовної роботи ЛБ на інтервалі напрацювання  $(t_k, t)$  з урахуванням того, що в моменти  $t_1, t_k$  проводилось ТО, що включало в себе експлуатаційний контроль і відновлення забракованих ЛБ. При експоненційному законі напрацювання на відмову цей показник має наступний вигляд:

$$P_c = (kt_{II}, t) = \sum_{j=0}^{k-1} \left( P_c(jt_{II}) \exp(-\lambda(t-jt_{II})) \cdot (1-\alpha)^{k-j} \right) + P_c(kt_{II}) \exp(-\lambda(t-kt_{II})), \quad (3)$$

$$kt_{II} \leq t \leq (k+1)t_{II},$$

де  $P_c(jt_{II})$  – ймовірність зняття ЛБ в базовому аеропорту, обумовлена як ймовірність того, що ЛБ буде забракований при КР за допомогою ВСК;

$t_{II}$  – середня тривалість між вильотом і посадкою ПС у базовому аеропорту.

Цей показник отриманий для нескінченного інтервалу часу планування ТО і має ті ж недоліки, що й показники (2), (3).

Літературні джерела [3] присвячені дослідженню паралельних, мажоритарних та комбінованих структур резервування з точки зору надійності, проте отримані в них показники не враховують достовірності засобів контролю. У роботі [11] розглядаються моделі для оцінки показників достовірності різних алгоритмів контролю при резервуванні систем, проте отримані в них показники не дозволяють оцінювати ефективність експлуатації РЕНС на кінцевому періоді експлуатації і не враховують особливості багаторазового КР і періодичність контролю. Крім того вони не враховують вплив явних і прихованих відмов на ефективність експлуатації.

Показники надійності технічних і радіоелектронних систем з урахуванням явних і прихованих відмов розглянуті в роботі [6], однак вони не враховують достовірність засобів контролю.

Таким чином, як показує аналіз особливостей експлуатації резервованих РЕНС, показники ефективності повинні поряд з характеристиками безвідмовності враховувати не тільки кратність, а й структуру резервування систем.

Крім того, показники ефективності резервованих РЕНС повинні бути чутливі до характеристик достовірності експлуатаційного КР, достатності системи забезпечення запасів і встановлювати аналітичний взаємозв'язок з параметрами технологічного процесу ТОіР.

В якості вартісних показників ефективності в літературі використовуються: наведені витрати, середні експлуатаційні витрати (втррати); питомі середні експлуатаційні витрати (втррати); питомий середній прибуток; наведені середньорічні витрати тощо.

У роботі [10] пропонується здійснювати оцінку ефективності різних стратегій ТОіР по комплексному критерію мінімуму середньорічних наведених витрат:

$$C = C_E + E_{II}K, \quad (4)$$

де  $C_E$  – середньорічні експлуатаційні витрати;

$K$  – капітальні вкладення процес експлуатації;

$E_{II}$  – нормативний термін окупності капітальних вкладень.

У перерахованих роботах отримано вирази для складових цього показника, що дозволяють встановити взаємозв'язок між основними ймовірностями і вартісними характеристиками процесу ТОiP, а також капітальними вкладеннями в НАСК і ОФ. Однак вони отримані при тих же обмеженнях, що і показники (1) і (2). Крім того, в них не враховується показник СЧНПР.

Як показано в літературних джерелах [12], в даний час використання наведених витрат для оцінки ефективності інвестицій та проєктів недоцільно, оскільки відсутнє державне нормування нормативного терміну окупності капітальних вкладень, який задавався єдиним нормативом для всіх галузей народного господарства.

Крім того, при використанні наведених витрат не враховується фактор часу в оцінці інвестицій.

Процес експлуатації ПС безпосередньо пов'язаний з капітальними вкладеннями в закупівлю наземних засобів експлуатаційного контролю і формування ОФ РЕНС.

Тому критерії для оцінки ефективності повинні враховувати ефективність капітальних вкладень (інвестицій).

В даний час відомі наступні інтегральні показники ефективності інвестицій [12]:

- чистий дохід (Net Value - NV);
- чистий дисконтований дохід (Net Present Value - NPV);
- внутрішня норма прибутковості (Internal Rate of Return - IRR);
- індекси прибутковості витрат та інвестицій;
- дисконтований термін окупності (Payback Period).

Ці показники є узагальненими і їх доцільно використовувати для оцінки ефективності інвестицій на самому верхньому рівні для всієї авіакомпанії в цілому. Однак однією зі складових для кожного показника неодмінно будуть експлуатаційні витрати.

У роботі [6] для оцінки ефективності експлуатації технічних систем широко використовуються показники у вигляді:

- повних розрахункових (очікуваних) витрат TEC (total expected cost), повних експлуатаційних витрат за період життєвого циклу TLOC (total lifetime operating costs);
- у вигляді повних розрахункових експлуатаційних витрат за період життєвого циклу (ПЕВ).

Показник у вигляді повних розрахункових (очікуваних) витрат TEC розглянуто в роботах [6] запропонований для випадку проведення періодичного КР в моменти часу на нескінченному інтервалі планування технічного обслуговування при довільному законі розподілу напрацювання на відмову блоку:

$$TEC(T_1, T_2, \dots) = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{T_k}^{T_{k+1}} [c_1(k+1) + c_2(T_{k+1} - t)] dF(t) + c_3, \quad (5)$$

де  $F(t)$  – функція розподілу напрацювання на відмову блоку;

$\bar{n}_1$  – середня вартість одного КР;

$\bar{n}_2$  – середня вартість втрат за період між відмовою і наступним КР, при якому він виявляється (втрати через приховані відмови);

$c_3$  – середня вартість заміни блоку, що відмовив.

У цих же роботах розглядається вартісний показник на кінцевому інтервалі планування ТО причому КР проводиться через певні періоди часу  $kT$  ( $k=1, 2, \dots, N$ ),  $NT \equiv S$ :

$$\begin{aligned} TEC(N) &= \sum_{k=0}^{N-1} \int_{kT}^{(k+1)T} (c_1(k+1) + c_2((k+1)T - t)) dF(t) + \\ &+ c_1 N \bar{F}(NT) + c_3 = \quad (6) \\ &= \left( c_1 + \frac{c_2 S}{N} \right) \sum_{k=0}^{N-1} \bar{F}\left(\frac{kS}{N}\right) - c_2 \int_0^S \bar{F}(t) dt + c_3, \\ &N = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Показники (5) і (6) не враховують показників достовірності контролю і зовнішній прояв відмов. Використання цих показників для оцінки ефективності експлуатації РЕС важко, оскільки вони не враховують особливості технологічного процесу ТОiP РЕС, витрати на виконання операцій ТО і особливості діагностичного забезпечення. Вартісний показник повинен також враховувати капітальні вкладення в НАСК і ОФ.

Тому ці показники повинні бути вдосконалені для практичного використання при оцінці ефективності експлуатації РЕС ПС.

На підставі проведеного огляду і аналізу показників ефективності системи ТОiP можна зробити такі висновки:

- у більшості математичних моделей не враховуються показники достовірності КР. А там, де вони використовуються, не враховуються особливості багаторазового КР РЕНС в процесі експлуатації, яка полягає в тому, що умовні ймовірності рішень в даний момент залежать від результатів попередніх КР;

- відсутні математичні моделі ТО, в яких одночасно враховувались би показники безвідмовності, ремонтпридатності РЕНС, достовірності багаторазового експлуатаційного контролю, його тривалості, а також вплив структури резервування РЕНС з точки зору надійності;

- відомі показники, що враховують достовірність багаторазового КР, отримані при допущенні про нескінченному інтервалі часу планування ТО;

- відсутні імовірнісні показники ефективності ТО, що дозволяють враховувати зовнішній прояв відмов, тобто інтенсивності виникнення як прихованих, так і явних відмов;

- відсутні показники, що дозволяють оцінювати комплексні показники надійності і безвідмовності

РЕНС протягом польоту ПС з урахуванням зовнішнього прояву відмов на кінцевому і нескінченному інтервалах часу;

- в даний час відсутній комплексний техніко-економічний показник, що дозволяє встановлювати взаємозв'язок між основними ймовірностями і варті-

сними характеристиками процесу ТОiP, а також обсягом капітальних вкладень в НАСК і ОФ;

- відомі вартісні показники ефективності експлуатації не чутливі до середнього часу напрацювання РЕНС на достроковий зйом з борту ПС (СЧНПР).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Statistical management and modeling for demand of spare parts / [ E. Ferrari, A. Pareschi, A. Regattieri, A. Persona] // Springer Handbook of Engineering Statistics: Springer London. – 2006. – P. 905–929.
2. Воробьев В. Г. Техническое обслуживание и ремонт авиационных электросистем и пилотажно – навигационных комплексов : учебник / В. Г. Воробьев, В. Д. Константинов. – М. : Унив. кн., 2007 – 470 с.
3. Глухов В. В. Выбор стратегий промышленного предприятия / В. В. Глухов, А. В. Демидов. – СПб. : Северная звезда, 2002. – 246 с.
4. Емельянов В. Е. Испытания и эксплуатация авиационной и ракетно–космической техники. Транспортное радиооборудование: учеб. пособие / В. Е. Емельянов. – М.: МГТУ ГА, 2008. – 70 с.
5. Емельянов В. Е. Техническая эксплуатация авиационного РЭО: Основные вопросы теории / В. Е. Емельянов. – М.: МГТУ ГА, 2000. – 162 с.
6. Живетин В. Б. Риски и безопасность авиационных систем : анализ, прогнозирование, управление / В. Б. Живетин. – М. : Изд-во ИПР, – 2006. – 310 с.
7. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
8. 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., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
9. Коначович Г. Ф. Оценка влияния функциональных отказов бортовых радиоэлектронных систем на безопасность и регулярность полетов / Г. Ф. Коначович, И.А. Мачалин, В. Г. Потапов, О. П. Ткалич // Матеріали IV Міжнар. НТК “Авіа–2002”. – К.: НАУ, 2002. – Т.2. – С.11.67–11.69.
10. Коначович, Г. Ф. Аппроксимация одного класса случайных процессов в задачах контроля радиоэлектронных систем// Матеріали IV Міжнародної НТК [ “Авіа–2002” / Г. Ф. Коначович, И. А. Мачалин, О. П. Ткалич. – К.: НАУ, 2002. – Т2. – С. 67–69.
11. Макаров В. М. Логистика. Управление запасами в логистических системах / В. М. Макаров. – СПб. : Изд-во Политехи. Ун-та, 2005. – 97 с.
12. Мачалин И.А. Оптимальные задачи управления запасами систем авионики / и. А Мачалин // Матеріали VII Міжнар. НТК “Авіа–2006”. – К.:НАУ,– 2006.–С. 12.47–12.51.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К. С. Козелкова,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 27.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.09.2019

### Анализ показателей и критериев эффективности системы технической эксплуатации радиоэлектронных навигационных систем

С. В. Рагулин, И. А. Сыроежка

Возрастание сложности радиоэлектронных навигационных систем воздушных судов и расширение круга выполняемых ими функций привели к тому, что для управления техническим состоянием радиоэлектронных навигационных систем предприятия вынуждены выполнять значительный объем работ по техническому обслуживанию и ремонту. Современные воздушные суда оснащаются цифровыми пилотажно-навигационными комплексами нового поколения, в которых все системы имеют встроенные системы; контроля и конструктивно выполняются в виде ряда легкозаменяемого блока. Эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и ремонт радиоэлектронных навигационных систем в настоящее время достигают 30–40% от общей стоимости технического обслуживания и ремонта воздушного судна, поэтому актуальным является вопрос повышения эффективности системы технического обслуживания и ремонта за счет снижения эксплуатационных расходов при сохранении летной годности и конкурентоспособности воздушного судна.

**Ключевые слова:** авионики, надежность, радиоэлектронные системы, техническое обслуживание и ремонт.

### Analysis of indicators and system performance criteria technical operation of electronic navigation systems

S. Ragulin, I. Syroizhko

The increasing complexity of aircraft electronic navigation systems and the expansion of the range of functions performed by them have led enterprises to perform a significant amount of maintenance and repair work to manage the technical state of radio electronic navigation systems. Modern aircraft are equipped with a new generation of digital navigation and navigation systems, in which all systems have integrated systems; control and structurally performed as a series of easily replaceable unit. Maintenance costs for maintenance and repair of electronic navigation systems currently reach 30–40% of the total cost of maintenance and repair of the aircraft, therefore, the urgent issue is to increase the efficiency of the maintenance and repair system by reducing operating costs while maintaining airworthiness and competitiveness the aircraft.

**Keywords:** avionics, reliability, radio-electronic systems, maintenance and repair.

# Управління в складних системах

УДК 006.91

doi: 10.26906/SUNZ.2019.5.007

П. Л. Аркушенко<sup>1</sup>, О. І. Вервейко<sup>1</sup>, М. Ю. Яковлев<sup>2</sup>, О. П. Флорін<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна

<sup>2</sup> Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТАНДАРТІВ США ЩОДО МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

**Метою статті** є визначення особливостей стандартів США, які визначають вимоги щодо метрологічного забезпечення випробувань озброєння та військової техніки на основі їх аналізу. Для міністерства оборони США розробка і впровадження документів по стандартизації здійснюється за програмою оборонної стандартизації Defense Standardization Program в рамках діяльності з управління стандартизацією Standardization Management Activities. Документи зі стандартизації включають 5 видів. У США метрологічне забезпечення озброєння та військової техніки для всіх видів військ регламентовано десятками стандартів, серед яких виділено 4 основних: MIL-STD-1839D, MIL-HDBK-1839A, DI-QCIC-80278C, MIL-STD-810D. Метрологічне забезпечення випробувань за стандартом MIL-STD-810G, представлене в узагальненому вигляді, регламентує вимоги до випробувального і вимірювального обладнання, інтервалів калібрування та сумарної похибки (або невизначеності вимірювань) випробувального та вимірювального обладнання. Згідно стандартів США все обладнання, що має метрологічні характеристики, розділене на 4 види, які об'єднані в дві групи, а саме: 1) випробувальне, вимірювальне та діагностичне обладнання (Test, Measurement, and Diagnostic Equipment (TMDE)); 2) вбудоване обладнання для випробувань (Built-in-Test Equipment (BITE)). Зведені вимоги до калібрування та вимірювання (Calibration and measurements requirements summary (CMRS)) MIL-HDBK-1839A деталізують вимоги: щодо вимірювальної системи, підсистеми або обладнання; TMDE; до стандартів та обладнання калібрування, які необхідні для забезпечення метрологічної простежуваності всіх вимірювань через окремі військові відомчі метрологічні та калібрувальні програми до затверджених національних стандартів. Військовий стандарт MIL-STD-810G регламентує ряд стандартних параметрів для великої кількості лабораторних випробувань військової продукції, що дозволяє визначити стійкість широкого переліку обладнання до різних впливів. Визначені за результатами аналізу стандартів США особливості потрібно враховувати при розробці нормативних документів з метрологічного забезпечення випробувань в Збройних Силах України.

**Ключові слова:** випробування, стандарт, озброєння та військова техніка, метрологічне забезпечення, метрологічні характеристики.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В даний час Україна здійснює розбудову оборонно-промислового комплексу країни, як державного його сегменту, так і приватного.

Саме останній впродовж п'яти років активно почав розвиватись, тому, що українське військо стало потребувати нових «готових рішень» зразків військової техніки та подвійного призначення. А державні підприємства, які звикли до класичної схеми створення військової техніки у вигляді дослідно-конструкторської роботи, як показав досвід, не завжди готові надати сучасні зразки. При цьому приватні підприємства-розробники, за рахунок власних обігових коштів, виявляють більшу спритність, щодо доведення зразків готової продукції військового призначення до працездатного стану, шляхом усунення недоліків за результатами приймальних випробувань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З обранням Україною курсу на євроінтеграцію та

вступ до НАТО, роль ефективності випробувань значно зросла. Успішна експлуатація військової техніки у військах залежить від ефективності випробувань зразків озброєння і військової техніки, які покликана дати повну та об'єктивну оцінку зразка [1].

Ефективність випробувань базується на різних видах забезпечення.

До основних видів належить і метрологічне забезпечення випробувань (МЗ), - яке, відповідно до [2], є «комплексом заходів, спрямованих на досягнення єдності вимірювань та достовірності контролю параметрів об'єктів вимірювання військового призначення».

Метрологічне забезпечення випробувань повинно враховувати останні зміни у нормативної документації в галузі метрології і деякі положення стандартів провідних країн світу, зокрема, США.

**Формулювання мети статті.** Визначити особливості стандартів США щодо метрологічного забезпечення випробувань озброєння та військової техніки.

## Виклад основного матеріалу

Для міністерства оборони США розробка і впровадження документів по стандартизації здійснюється за програмою оборонної стандартизації (Defense Standardization Program) в рамках діяльності з управління стандартизацією (Standardization Management Activities).

Документи зі стандартизації включають 5 видів.

Пошук інформації по військовій стандартизації Національний інститут стандартів і технологій США (National Institute of Standards and Technology) рекомендує здійснювати по базі даних ASSIST, яка є офіційним джерелом специфікацій і стандартів Міністерства оборони [3].

У базі даних ASSIST проіндексовано 114152 технічних документів, міститься 224739 PDF-файлів, пов'язаних з 86856 проіндексованими документами.

Вона надає безкоштовний доступ до відкритих технічних документів у вигляді анотації, PDF-файлів базового документа і всіх його змін.

Зокрема, на стандарт MIL-STD-810 надається 19 PDF-файлів, причому більшість з них має обсяг понад 1000 сторінок.

Військово-технічний інформаційний центр США (The Defense Technical Information Center (DTIC), який діє під керівництвом міністра оборони і підзвітний заступнику міністра оборони США з досліджень і розробок, є найбільшим центральним ресурсом Міністерства оборони для надання наукової, технічної, інженерної та комерційної інформації [4].

Більша частина записів в колекції DTIC доступна тільки авторизованому персоналу Міністерства оборони і його підрядникам, персоналу федерального уряду, державним підрядникам і обраним академічним установам.

Доступ до нетаємної інформації, яка містить багато повнотекстових документів, доступний без реєстрації.

Військові стандарти США для вивчення, аналізу та узагальнення відбиралися за назвами і рефератам на них по двох напрямках:

стандарти, що регламентують вимоги до випробувального та вимірювального обладнання,

стандарти, що регламентують проведення випробувань, для діставання інформації про метрологічне забезпечення.

У США метрологічне забезпечення озброєння та військової техніки для всіх видів військ регламентовано десятками стандартів, серед яких виділено 4 основних [5-8].

У стандарті [4] все обладнання, що має метрологічні характеристики (MX), розділене на 4 види, які об'єднані в дві групи.

1. Випробувальне, вимірювальне та діагностичне обладнання (Test, Measurement, and

Diagnostic Equipment (TMDE)) – будь-яка система або пристрій, що використовується для випробування, вимірювання, оцінки, перевірки або іншого аналізу матеріалів, обладнання або системи для виявлення та/або ізоляції будь-якої фактичної або потенційної несправності або визначення відповідності специфікаціям, встановленим у технічних документах.

2. Вбудоване обладнання для випробувань (Built-in-Test Equipment (BITE)) – будь-який пристрій, який є частиною системи, підсистеми або обладнання і використовується з метою тестування.

При визначенні метрологічних характеристик озброєння та військової техніки стандарт вимагає враховувати коефіцієнт невизначеності (Test Uncertainty Ratio (TUR)), який характеризує співвідношення між максимально допустимою невизначеністю параметра або характеристики озброєння та військової техніки, що підлягають вимірюванням при випробуваннях, та невизначеністю, що забезпечує MX.

Цей коефіцієнт враховує можливі джерела помилок, зокрема, температуру, вологість, невизначеності типу А, невизначеності типу В, тощо. Мінімальне значення TUR повинно бути 4 до 1.

Якщо вказане значення не може бути досягнуто, то надають документальне обґрунтування для меншого значення TUR.

При аналізі лише вхідних впливів, які не використовуються для характеристики TMDE або BITE, мінімальне значення TUR 1 до 1 є прийнятним.

На всіх етапах життєвого циклу озброєння та військової техніки слід виконувати загальні вимоги щодо вимірювання:

– всі параметри, які підлягають вимірюванню, ідентифіковані та задокументовані;

– вбудоване програмне забезпечення, необхідне для вимірювання або тестування, повинне бути забезпечене анотацією за версією, номеру редакції і датою перегляду. Будь-які зміни в них повинні бути задокументовані;

– калібрування і вимірювання виконуються за необхідністю для підтримки працездатності системи та підсистеми;

– всі параметри є легкодоступними і їх вимірюють таким чином, щоб мінімізувати кількість і тривалість необхідних випробувань;

– задокументована метрологічна простежуваність всіх параметрів системи та підсистеми.

Керівництво користувача [6] призначене для надання споживачам більш глибокого розуміння вимог MIL-STD-1839D, а також для надання допомоги в забезпеченні однакової оцінки відповідності виробів індивідуальним вимогам.

У цьому керівництві наводяться вимоги з відповідних розділів MIL-STD-1839D для зручності використання, з наступним рекомендаціями щодо застосування цих вимог, зокрема, зазначається, що



застосування надмірно суворих вимог може нести суттєві непотрібні витрати.

Однак цей посібник не може змінювати або доповнювати будь-які вимоги MIL-STD-1839D.

Зведені вимоги до калібрування та вимірювання (Calibration and measurements requirements summary (CMRS)) [6] деталізують вимоги:

щодо вимірювальної системи, підсистеми або обладнання;

TMDE;

до стандартів та обладнання калібрування, які необхідні для забезпечення метрологічної простежуваності всіх вимірювань через окремі військові відомчі метрологічні та калібрувальні програми до затверджених національних стандартів.

Дані, представлені в CMRS, вимагають періодичного оновлення, щоб врахувати зміни в конструкції, в технології, зумовлені вдосконаленням системи тощо, які впливають на вимоги щодо вимірювальної системи або TMDE.

Структура CMRS містить 11 розділів, вимоги до побудови, викладення та оформлення яких детально і з прикладами наведені в DI-QCIC-80278C.

Військовий стандарт MIL-STD-810G регламентує ряд стандартних параметрів для великої кількості лабораторних випробувань військової продукції, що дозволяє визначити стійкість широкого переліку обладнання до різних впливів в непольових умовах, таких як:

пил,  
пісок,  
вологість,  
тиск,  
падіння,  
вібрація, тощо.

Цей стандарт схвалений для використання всіма департаментами та агентствами Міністерства оборони США.

Проходження випробувань по ньому є необхідною умовою для участі в замовленнях на поставку техніки і комплектуючих.

Спочатку даний стандарт створювався для випробувань військової продукції, але згодом став широко застосовуватися і для випробувань цивільної продукції.

Метрологічне забезпечення випробувань за стандартом MIL-STD-810G, представлене в узагальному вигляді, регламентує наступні вимоги:

– все випробувальне і вимірювальне облад-

нання повинно бути відкалібровані відповідно до лабораторних стандартів з визначенням метрологічної простежуваності до національних еталонів через первинні еталони;

– інтервали калібрування повинні відповідати вимогам ANSI / NCSL Z540.1 або ISO 10012-1;

– сумарна похибка або невизначеність вимірювань випробувального та вимірювального обладнання не повинна перевищувати однієї третина від похибки або невизначеності параметра або характеристики досліджуваного об'єкта, якщо інше не обумовлено в методиці випробувань.

## Висновки

Вивчення, аналіз та узагальнення стандартів США дозволили визначити наступні основні особливості:

1) поділ калібрувального і вимірювального обладнання на види і типи відрізняється від прийнятого в Україні;

2) керівництво користувача стандарту дозволяє помітно спростити розуміння і застосування вимог стандартів;

3) метрологічна простежуваність калібрувального і вимірювального обладнання повинна бути задокументована;

4) мінімальне значення TUR повинно бути 4 до 1, якщо документальне обґрунтування для меншого значення TUR не надано;

5) терміни «єдність вимірювань» та «достовірність контролю» в зазначених стандартах США не застосовуються;

6) концепція єдності вимірювань видозмінена на концепцію демонстрації простежуваності, яка базується на концепції та відповідних процедурах калібрування;

7) для усунення недоліків терміну «похибка вимірювань» застосовується проста, зрозуміла і загальновизнана в міжнародному масштабі характеристика якості результату вимірювань - невизначеність вимірювань.

Вказані вище особливості необхідно враховувати при розробці нормативних документів (в тому числі військових стандартів) з метрологічного забезпечення випробувань в Міністерстві оборони України та Збройних Силах України зважаючи на курс щодо переходу вітчизняних збройних сил на стандарти країн-членів Північно-Атлантичного договору.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткач В. Час змін // Defense Express. 2018.-№ 1.- С. 14-19.
2. Положення про метрологічну службу Міністерства оборони України та Збройних Сил України // Наказ міністра оборони України № 288: 24.04.2017. - 13 с.
3. Quick Search // ASSIST. - <https://quicksearch.dla.mil/qsOverview.aspx>. - дата доступу: 23.05.2019.
4. Defense Technical Information Center // <https://discover.dtic.mil/>. - дата доступу: 25.05.2019.
5. MIL-STD-1839D. Department of defense. Standard practice. Calibration and measurement requirements. - Чинний від 2010-12-06.- USA: DoD, 2010. – 12 с.

6. MIL-HDBK-1839A. Department of defense. Handbook. Calibration and measurement requirements. - Чинний від 2000-11-27.- USA : DoD, 2000. – 44 с.
7. DI-QCIC-80278C. Data item description. Calibration and measurements requirements summary (CMRS). - Чинний від 2017-01-23.- USA : DoD, 2017. – 18 с.
8. MIL-STD-810D. Department of defense. Test method standard. Environmental engineering considerations and laboratory tests. - Чинний від 2014-15-05.- USA : DoD, 2010. – 12 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. В. М. Чуприна,  
Державний науково-дослідний інститут озброєння  
та військової техніки, Чернігів  
Received (Надійшла) 18.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.10.2019

### **Определение особенностей стандартов США о метрологическом обеспечении испытаний вооружения и военной техники**

П. Л. Аркушенко, А. И. Вервейко, М. Ю. Яковлев, А. П. Флорин

Целью статьи является определение особенностей стандартов США, какие определяют требования к метрологическому обеспечению испытаний вооружения и военной техники на основе их анализа. Для министерства обороны США разработка и внедрение документов по стандартизации осуществляется по программе оборонной стандартизации в рамках деятельности по управлению стандартизацией. Документы по стандартизации включают 5 видов. В США метрологическое обеспечение вооружения и военной техники для всех видов войск регламентировано десятками стандартов, среди которых выделено 4 основных: MIL-STD-1839D, MIL-HDBK-1839A, DI-QCIC-80278C, MIL-STD-810D. Метрологическое обеспечение испытаний по стандарту MIL-STD-810G, представлено в обобщённом виде, регламентирует требования к испытательному и измерительному оборудованию, интервалам калибровки и суммарной погрешности (либо неопределённости измерений) испытательного и измерительного оборудования. Согласно стандартам США все оборудование, которое имеет метрологические характеристики, разделено на 4 вида, которые объединены в две группы, а именно: 1) испытательное, измерительное и диагностическое оборудование; 2) встроенное оборудование для испытаний. Обобщённые требования к калибровке и измерениям MIL-HDBK-1839A детализируют требования: относительно измерительной системы, подсистемы или оборудования; TMDE; к стандартам и оборудованию калибровки, которые необходимы для обеспечения метрологической прослеживаемости всех измерений через отдельные войсковые ведомственные метрологические и калибровочные программы до утвержденных национальных стандартов. Военный стандарт MIL-STD-810G регламентирует ряд стандартных параметров для большого количества военной продукции, что позволяет определить стойкость широкого перечня оборудования к разным влияниям. Определённые по результатам анализа стандартов США особенности необходимо учитывать при разработке нормативных документов по метрологическому обеспечению испытаний в Вооружённых Силах Украины.

**Ключевые слова:** испытания, стандарт, вооружение и военная техника, метрологическое обеспечение, метрологические характеристики.

### **Determination of peculiarities of US standards on metrological support**

P. Arkushenko, A. Verweiko, M. Yakovlev, A. Florin

The purpose of the article is to identify the features of US standards that determine the requirements for metrological support for armament and military equipment testing based on their analysis. For the US Department of Defense, standardization documents are developed and implemented under the Defense Standardization Program as part of the Standardization Management Activities. Standardization documents include 5 types. In the US, the metrological support of the armament and military equipment for all services and branches is regulated by dozens of standards, among which there are 4 basic ones: MIL-STD-1839D, MIL-HDBK-1839A, DI-QCIC-80278C, MIL-STD-810D. The MIL-STD-810G metrology test specification, presented in a generalized form, regulates the requirements for testing and measuring equipment, calibration intervals and total error (or measurement uncertainty) of test and measuring equipment. According to US standards, all metrological equipment is divided into 4 types, which are grouped into two groups, namely: 1) Test, Measurement, and Diagnostic Equipment (TMDE); 2) Embedded Built-in-Test Equipment (BITE). MIL-HDBK-1839A Calibration and Measurement Requirements Summary (CMRS) details the requirements: for the measuring system, subsystem or equipment; TMDE; to the standards and calibration equipment necessary to ensure the metrological traceability of all measurements through separate military departmental metrology and calibration programs to the approved national standards. The MIL-STD-810G military standard regulates a number of standard parameters for a large number of laboratory tests of military products, which allows to determine the resistance of a wide range of equipment to various influences. The peculiarities of the analysis of the standards of the USA should be taken into account in the development of regulatory documents for metrological testing in the Armed Forces of Ukraine.

**Keywords:** tests, standard, armament and military equipment, metrological support, metrological characteristics.

Д. М. Главчев

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

## ПРОГРАМНІ КОМПОНЕНТИ БОРТОВОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ДИЗЕЛЬ-ПОТЯГА

При вирішенні завдань в рамках геометричної теорії управління виникають проблеми, пов'язані зі складністю виконання розрахунку похідних Лі, перевірки розподілень на інволютивність, пошуку функцій перетворення, які пов'язують змінні та рівняння лінійної та нелінійної моделей. При виконанні цих операцій людиною виникає потреба у виконанні занадто об'ємних аналітичних розрахунків які можуть стати причиною відмови від застосування геометричної теорії управління. Вирішити цю проблему можна за допомогою використання спеціалізованого програмного забезпечення, що розглядається як програмне забезпечення для бортової комп'ютерної системи дизель-потяга, яке здатне автоматизувати необхідні розрахунки, чим істотно скоротити час виконання лінеаризації та пошуку функцій перетворення для математичних моделей за рахунок використання потужностей комп'ютерної техніки та нейронних мереж. **Метою роботи** є розробка спеціалізованого програмного забезпечення для виконання лінеаризації математичних моделей та пошуку функцій перетворення за рахунок використання нейронних мереж та можливостей мови програмування, що має графічний інтерфейс для взаємодії з користувачем. **Результати.** За допомогою можливостей сучасних мов програмування на основі запропонованих алгоритмів обробки даних та нейронних мереж запропонованої структури, розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для виконання перетворення нелінійних математичних моделей у лінійну форму Бруновського та пошуку функцій перетворення. При використанні розробленого програмного забезпечення збільшується швидкість виконання процесу лінеаризації, пошуку функцій перетворення, а графічний інтерфейс та коментарі, які висвітлює програмне забезпечення в процесі роботи дають можливість оперувати користувачам, які не мають спеціальної підготовки. Порівняння результатів моделювання нелінійної математичної моделі з лінійною математичною моделлю у формі Бруновського показало повне співпадіння та підтвердило правильність теоретичних положень та еквівалентність нелінійної та лінійної моделей. **Висновки.** Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для автоматизації аналітичних перетворень геометричної теорії управління, вирішення систем рівнянь в часткових похідних, для визначення функцій перетворень, що зв'язують змінні лінійної та нелінійної моделей. Промодельовано ряд об'єктів, які показали працездатність програмного забезпечення.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, форма Бруновського, математична модель, нейронні мережі, геометрична теорія управління.

### Постановка проблеми і аналіз літератури

Розвиток залізничної галузі в Україні потребує створення системи підтримки прийняття рішень машиніста та системи автомашиніста. Адже в високорозвинених країнах Америки та Європи завантаженість залізничних шляхів є досить високою, проте використання спеціалізованих систем управління допомагають вирішити питання оптимального руху потяга по маршруту його слідування з урахуванням факторів що впливають на нього: розклад руху, профіль шляху, особливості залізничного полотна, погодні умови, тощо. В нашій країні цього поки що немає, але питання створення аналогічних систем на потягах вітчизняного виробництва вже стоїть досить гостро. Адже сьогодні не можна покладатися лише на досвід машиніста, необхідно використовувати науковий підхід для виконання відповідних розрахунків, результати яких будуть перетворені в нормальну для сприйняття людиною форму, та надаватимуть машиністу підказки, в залежності від поточної ситуації на маршруті. В перспективі дані системи можуть бути модернізовані до систем автоматичного ведення потяга [1 – 8]. Але, як і в будь-якому напрямку розвитку технологій, тут існують певні обмеження, адже процеси руху рухомого складу більш-менш точно описуються за допомогою систем звичайних нелінійних диференціальних рівнянь високого порядку, то визначення оптимальних законів управління в реальному часі є декілька ускладненим. Лінеаризація

по Тейлору таких систем рівнянь дозволяє отримати системи лінійних рівнянь, но тільки на окремих точках, що не дозволяє визначити оптимальні закони управління тяговим рухомим складом під час його прямування. Однак, привабливість добре розробленої теорії лінійних систем управління призвела до створення геометричної теорії управління, яка дозволяє отримати системи нелінійних рівнянь, що будуть еквівалентними початковим нелінійним системам рівнянь в усій області змін змінних початкового нелінійного об'єкта управління. [1, 3, 6 – 8].

Труднощі, пов'язані з синтезом оптимальних систем управління для нелінійних об'єктів, зіграли важливу роль в розробці методів лінеаризації нелінійних систем, з подальшим застосуванням до них теорії лінійних систем управління. Однак, в даному випадку також існують обмеження. Нажаль, лінеаризація по Тейлору, яка найчастіше застосовується, обмежена лише лінеаризацією невеликої частини простору навколо обраної робочої точки, а це не дає можливості застосовувати її для лінеаризації складних об'єктів, таких як дизель-потяг [1, 3]. Однак, було розроблено нові методи, які мають в своїй основі ГТУ. Дані методи дозволяють виконувати лінеаризацію нелінійних систем управління за допомогою зворотного зв'язку у просторі “вхід – стан” та “вхід – вихід”. ГТУ дозволяє отримати еквівалентну лінійну модель на всій площині, тому, вона зараз активно розвивається та застосовується [3, 6 – 8].

Проте виконання таких перетворень призводить до необхідності виконання величезних об'ємів

аналітичних розрахунків, які займають багато часу, та в яких легко допустити помилку [1, 3]. Тому ГТУ звичайно застосовується для роботи з об'єктами, які описувалися системами диференціальних рівнянь до шостого порядку. Тому, перекладення цієї задачі з людини на комп'ютерну техніку стало не питанням часу, а необхідністю. Адже використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволило б зменшити кількість часу, який би витрачався на процес лінеаризації, а також зменшити кількість потенційних помилок, які могли виникнути внаслідок людського фактору [1, 3, 6 – 8].

Питанням створення програмного забезпечення, яке б мало можливість виконувати такі дії було присвячено увагу у роботі [1]. Більш того, програмне забезпечення було створено, і виконувало свої функції, проте воно є недосконалим адже має наступні мінуси. Дане програмне забезпечення [1] залежить від математичного пакету, адже напряду працює саме з нього, тому зміна функціоналу чи набору інструкцій в математичному пакеті може вплинути на загальну працездатність програмного забезпечення. Також, усі змінні та вхідні параметри закодовані у кодї відповідних файлів, тому для того, щоб виконати певні зміни, чи виконати лінеаризацію іншого об'єкту, необхідно втручатися в програмний код та переписувати його, а це значно підвищує планку та вимоги до фахівця, який повинен буде працювати з цією програмою. Це сильно ускладнює можливості використання даного програмного забезпечення [1, 3, 6 – 8].

Після отримання лінійної форми Бруновського для математичної моделі, постає задача пошуку функцій перетворення, що зв'язують змінні лінійної та нелінійної системи. Це також складна задача, яка потребує розв'язання систем рівнянь в часткових похідних, і яка потребує досить об'ємних розрахунків та при виконанні цієї задачі людиною, також може призводити до виникнення проблем через людський фактор. Саме тому, це також є серйозним етапом в виконанні перетворень, який необхідно автоматизувати та перекласти на розрахункові потужності комп'ютерної техніки [1, 3, 6 – 10].

З поміж різних способів пошуку функцій перетворення, підходящим для інтеграції в програмне забезпечення є той, що використовує в своїй основі нейронні мережі з відповідною структурою [1, 3]. В роботах інших науковців [1] було запропоновано використати структуру нейронної мережі на основі мереж типу АРТ, проте в рамках рішення цієї задачі в даній роботі пропонується використання нейронної мережі з більш простою структурою, яка має аналогічні можливості.

Отже, проблема є досить серйозною та складною, проте шляхи її вирішення окреслені, а досвід попередніх розробок може бути використаний в роботі над новою версією програмного забезпечення, що дозволить автоматизувати та пришвидшити процеси пов'язані з лінеаризацією та пошуком функцій перетворень, що пов'язують змінні нелінійної та лінійної математичних моделей.

**Метою роботи** є розробка спеціалізованого програмного забезпечення, яке буде являти собою

програмний компонент бортової комп'ютерної системи дизель-потяга, та дозволить автоматизувати процес перетворення нелінійної математичної моделі в лінійну математичну модель у формі Бруновського, а також процес пошуку функцій перетворення, що зв'язують змінні нелінійної та лінійної математичної моделей, а використання можливостей розробки додатків з графічним інтерфейсом максимально спростило задачу взаємодії користувача з даним програмним забезпеченням. Отже, основною метою роботи є заміна складних задач управління нелінійними об'єктами на більш прості задачі синтезу управління лінійними моделями в рамках ГТУ.

## Результати досліджень

При проектуванні спеціалізованого програмного забезпечення було пройдено декілька етапів: аналіз попередніх розробок, створення відповідних вимог до програмного забезпечення, яке необхідно розробити, створення його структури, перевірка характеристик програмного забезпечення на відповідність вимог якості згідно з вимог ДСТУ ISO/IEC 25010:2016 [11], створення алгоритмів роботи програмного забезпечення, створення схеми графічного інтерфейсу, розробка, тестування. В рамках аналізу попереднього програмного забезпечення була розглянута робота [1], виявлено його недоліки та сформовано вимоги до нового програмного забезпечення. Зокрема було модернізовано блок-схему людино машинної системи, яка автоматизує аналітичні розрахунки в ГТУ (рис. 1), де нові блоки, що додані в програмне забезпечення позначені більш темним кольором.

Після того, як вимоги до нового програмного забезпечення було сформовано, та визначено, наступним етапом стала перевірка відповідності програмного забезпечення, що розробляється, критеріям якості згідно з вимогами ДСТУ ISO/IEC 25010:2016 [11]. Критерії, по яким відбувалася перевірка зображено на рис. 2. Перевірка програмного забезпечення довела, що воно відповідає вказаним на рис. 2 вимогам. Крім того, було виконано перевірку програмного забезпечення по таким критеріям (де було вказано на вдосконалення в порівнянні з попередньої версією):

1. **Функціональність.** Функціонал програмного забезпечення розширений за рахунок автоматизації процесів, пов'язаних з аналізом вхідних даних, їх обробкою та перетворення в представлення, яке більш зручне для подальшої обробки засобами програмування чи математичним пакетом.

2. **Функціональність.** Функціонал програмного забезпечення розширений за рахунок автоматизації процесів, пов'язаних з аналізом вхідних даних, їх обробкою та перетворення в представлення, яке більш зручне для подальшої обробки засобами програмування чи математичним пакетом.

3. **Надійність.** Програмне забезпечення виконує тестування програмних модулів перед виконанням розрахунків.

4. **Зручність.** Графічний інтерфейс взаємодії з користувачем значно спростив процес роботи з програмним забезпеченням.

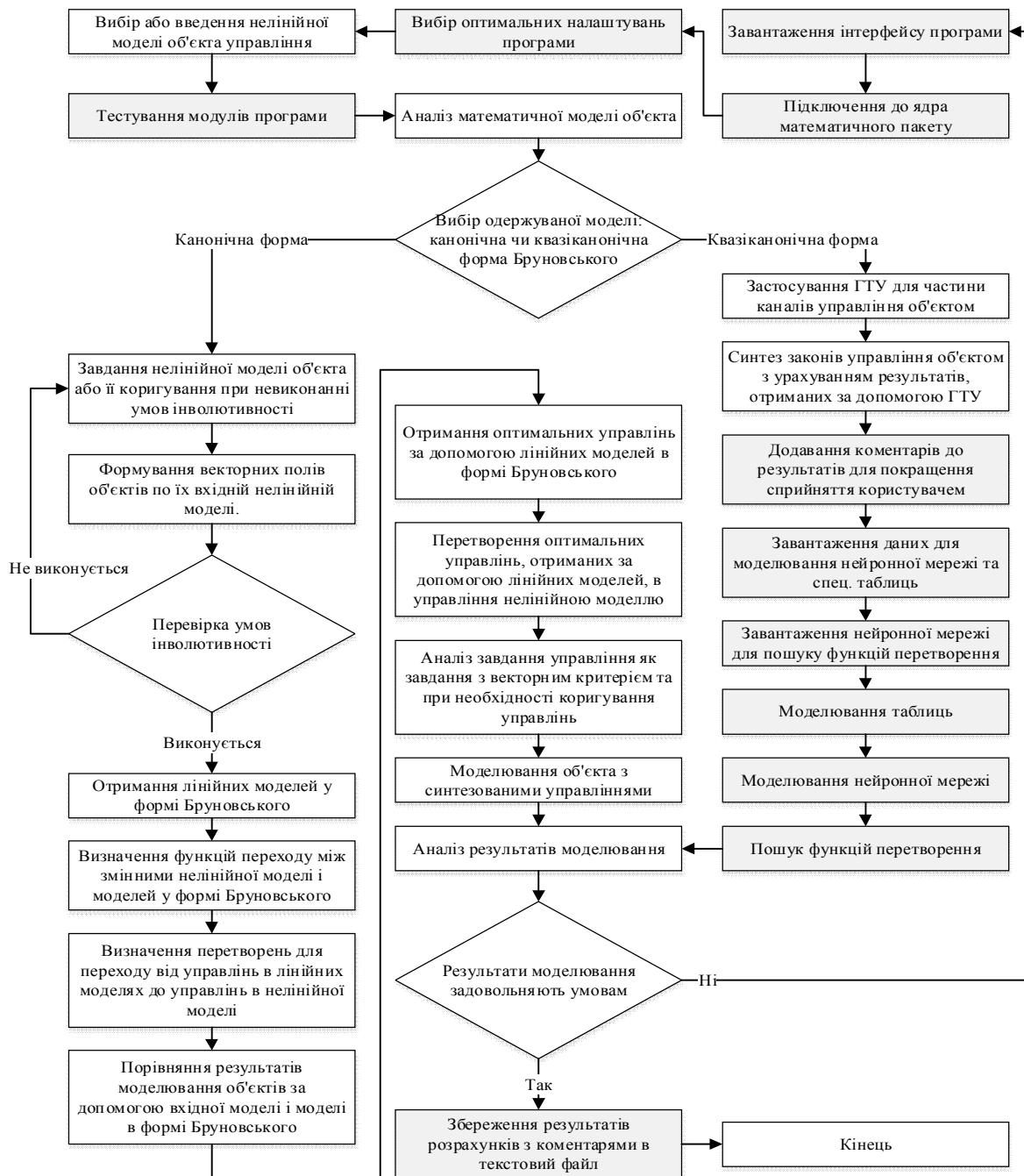


Рис. 1. Блок-схема людини машинної системи, яка автоматизує аналітичні розрахунки в ГТУ

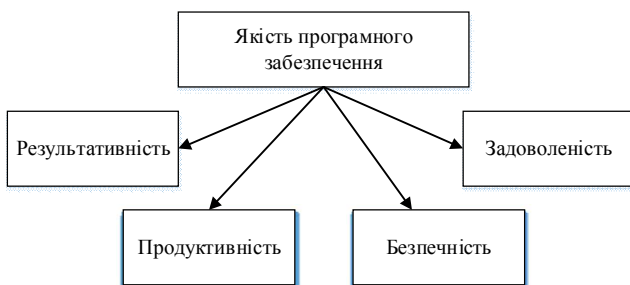


Рис. 2. Критерії якості програмного забезпечення згідно з ДСТУ ISO/IEC 25010:2016 [11]

**5. Ефективність.** Підвищена за рахунок оптимізації інструментами розробника, введення додаткових налаштувань для вмикання чи вимкання необхідного функціоналу.

**6. Супроводженість.** Структура програми складається з окремих модулів, кожен з яких може бути швидко оновлений чи змінений без виконання змін в інших модулях програмного забезпечення.

**7. Мобільність.** Програмне забезпечення являє собою виконавчий файл та декілька бібліотек до нього, тому може бути просто перенесене на інший комп'ютер, або заповане в інсталятор для більш зручного виконання інсталяції у разі необхідності встановлення даного програмного забезпечення на інших робочих станціях.

Під час проектування алгоритмів роботи програмного забезпечення, так створення його структури, було прийнято рішення поділити програмне забезпечення на відповідні модулі, які б дозволили виконати поставлене завдання, проте були б незале-

жними, що дозволило б без проблем оновлювати програмне забезпечення не цілком, а частинами, що значно спростило б цей процес, підвищило надійність та стабільність роботи програми, а також дозволило, відносно просто, додавати нові можливості та новий функціонал. Схема модулів програмного забезпечення зображена на рис. 3.

Розглянемо функції, які виконують блоки програмного забезпечення окремо:

1. **Блок завантаження даних.** Відповідає за отримання даних зі спеціальних текстових полів інтерфейсу користувача та переведення їх з текстового вигляду в програмне представлення.

2. **Блок тестування.** Виконує тестування блоків програмного забезпечення, перевіряє правильність перетворень тестових наборів даних.

3. **Компонент утиліт.** Використовується всередині програмного забезпечення для переведення даних програми з одного вигляду в інший. Містить функції для перегортання матриць, переведення їх в форму масиву чи тексту, тощо.

4. **Розрахунковий блок.** Виконує основні розрахунки, пов'язані з диференціюванням, розрахунком дужок Лі, отримання результату у формі Бруновського.

5. **Блок нейронної мережі пошуку функцій перетворення.** Виконує процеси пов'язані з роботою нейронної мережі під час пошуку функцій перетворення, що пов'язують змінні нелінійної та лінійної математичних моделей.

6. **Блок роботи з файловою системою.** Виконує функції взаємодії з файловою системою для збереження результатів роботи програми, завантаження вхідних даних, тощо.

Після того, як розробка і тестування роботи програмного забезпечення була завершена, необхідно було переконатися в правильності роботи програмного забезпечення. Для цього, було виконано лінеаризацію математичної моделі, а потім порівняно результати її моделювання для нелінійної та лінійної математичної моделі у формі Бруновського відповідно. Результати порівняння вихідних даних показали



Рис. 3. Структура модулів програмного забезпечення для бортової комп'ютерної системи дизель-потяга

повне співпадіння, що дозволяє стверджувати, що програмне забезпечення функціонує правильно. Можливості програмного забезпечення для бортової комп'ютерної системи, яке було розроблено, дозволяє перейти до наступного глобального етапу – це вирішення питання оптимального руху потяга по маршруту. Адже наявність можливості внесення змін в математичну модель та можливість, майже відразу, отримувати результат у вигляді її лінійного еквіваленту – це те, що дозволяє робити велику кількість експериментів, багаторазово виконувати прорахунки для одного і того ж відрізка шляху, чи маршруту в цілому, що дозволить знайти оптимальний режим руху дизель-потяга по маршруту його слідування з помірними наборами даних.

### Висновок

Таким чином, у статті описано суть проблеми, пов'язаної зі складністю проведення лінеаризації, і як наслідок, для її вирішення запропоновано розроблене програмне забезпечення, процес проектування, створення його структури, перевірки на відповідність вимогам якості, тестування, описано в даній статті. Результати використання програмного забезпечення підтвердили його роботоспроможність і правильність обраних алгоритмів та технологій. Звідси, можна виділити, що в рамках даної розробки було створено більш досконале програмне забезпечення, яке в більш короткий час та більш простий спосіб здатне вирішувати поставлені задачі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заковоротный А. Ю. Синтез автоматизированной системы управления подвижным составом на основе геометрической теории управления и нейронных сетей [Электронный ресурс]: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 / Александр Юрьевич Заковоротный; науч. консультант Дмитриенко В. Д.; Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – Харьков, 2017. – 433 с. – Библиогр.: с. 326 – 358.
2. Liu, B. & Gao, C. / Key Technologies of the Independent and Innovative Communications-Based Train Control Systems in China / Urban Rail Transit (2016) 2: 28. doi:10.1007/s40864-016-0035-z
3. Дмитриенко В. Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В. Д. Дмитриенко, А. Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр «НТМТ», 2013. – 248 с.
4. Verma, A. & Pattanaik, K.K. / Multi-agent communication-based train control system for Indian railways: the behavioural analysis / Journal of Modern Transportation (2015) 23: 272. doi:10.1007/s40534-015-0083-1
5. Albrecht, T. (2013), "Human factor challenges in the development of a driver advisory system for regional passenger trains", *Rail human factors: supporting reliability, safety and cost reduction*, Taylor & Francis, London, pp 129–138.

6. Программная компонента для поиска решений системы уравнений в частных производных в ГТУ методом группового учёта аргументов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, С.Ю. Леонов, Д.М. Главчев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Х.: НТУ "ХПІ", 2019. – №13 (1338). – С. 61 – 72.
7. Аграчев А.А., Сачков Ю.Л. Геометрическая теория управления: моногр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 392 с.
8. Исследование метода поиска функций преобразования нелинейных систем к эквивалентным линейным в геометрической теории управления / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Д.М. Главчев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Х.: НТУ "ХПІ", 2018. – № 42 (1318). – С. 20 – 35.
9. Charu C. Aggarwal Neural Networks and Deep Learning: A Textbook.– IBM T.J. Watson Research Center, 2018. – 94 с.
10. Главчев Д.М. Нейронная сеть, распознающая группы изображений / В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, Д.М. Главчев / Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2015, № 32 (1141). – С. 42 – 50.
11. ДСТУ ISO/IEC 25010:2016 Інженерія систем і програмних засобів. Вимоги до якості систем і програмних засобів та її оцінювання. Моделі якості системи та програмних засобів (ISO/IEC 25010:2011, IDT).

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О. О. Можасв,  
Харківський національний університет внутрішніх справ, Харків  
Received (Надійшла) 30.08.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.09.2019

### Программные компоненты бортовой компьютерной системы дизель-поезда

Д. М. Главчев

При решении задач в рамках геометрической теории управления возникают проблемы, связанные со сложностью выполнения расчета производных Ли, проверки распределений на инволютивность, поиска функций преобразования, которые связывают переменные и уравнения линейной и нелинейной моделей. При выполнении этих операций человеком возникает потребность в выполнении слишком объемных аналитических расчетов, которые могут стать причиной отказа от применения геометрической теории управления. Решить эту проблему можно с помощью использования специализированного программного обеспечения. Рассматривается программное обеспечение для бортовой компьютерной системы дизель-поезда, которое способно автоматизировать необходимые расчеты, чем существенно сократить время выполнения линеаризации и поиска функций преобразования для математических моделей за счет использования мощностей компьютерной техники и нейронных сетей. **Целью работы** является разработка специализированного программного обеспечения для выполнения линеаризации математических моделей и поиска функций преобразования за счет использования нейронных сетей и возможностей языка программирования, имеет графический интерфейс для взаимодействия с пользователем. **Результаты.** С помощью возможностей современных языков программирования на основе предложенных алгоритмов обработки данных и нейронных сетей предложенной структуры, разработано специализированное программное обеспечение для выполнения преобразования нелинейных математических моделей в линейную форму Бруновского и поиска функций преобразования. При использовании разработанного программного обеспечения увеличивается скорость выполнения процесса линеаризации, поиска функций преобразования, а графический интерфейс и комментарии, которые освещает программное обеспечение в процессе работы дают возможность оперировать пользователям, которые не имеют специальной подготовки. Сравнение результатов моделирования нелинейной математической модели линейной математической моделью в форме Бруновского показало полное совпадение и подтвердило правильность теоретических положений и эквивалентности, нелинейной и линейной математических моделей. **Выводы.** Разработано специализированное программное обеспечение для автоматизации аналитических преобразований геометрической теории управления, решения систем уравнений в частных производных, для определения функций преобразований, связывающих переменные линейной и нелинейной моделей. Промоделирован ряд объектов, которые показали работоспособность программного обеспечения.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, форма Бруновского, математическая модель, нейронные сети, геометрическая теория управления.

### Software components of the on-board computer system of a diesel train

D. Hlavchev

When solving problems within the framework of the geometric theory of control, problems arise related to the difficulty of calculating the Lie derivatives, checking distributions for involutivity, searching for transformation functions that relate variables and equations of linear and nonlinear models. When performing these operations, a person has a need to perform too voluminous analytical calculations, which may cause the refusal to apply the geometric theory of control. This problem can be solved by using specialized software. We consider software for the on-board computer system of a diesel train, which is able to automate the necessary calculations, thereby significantly reducing the time it takes to linearize and search for the conversion functions for mathematical models by using the power of computer technology and neural networks. **The aim of the work** is the development of specialized software to perform linearization of mathematical models and search for conversion functions through the use of neural networks and the capabilities of a programming language, has a graphical interface for user interaction. **Results.** Using the capabilities of modern programming languages based on the proposed data processing algorithms and neural networks of the proposed structure, specialized software has been developed for converting non-linear mathematical models into the linear Brunovsky form and searching for conversion functions. When using the developed software, the speed of the linearization process, the search for conversion functions increases, and the graphical interface and comments that the software illuminates during operation make it possible to operate users who do not have special experience. A comparison of the results of modeling a nonlinear mathematical model with a linear mathematical model in the form of Brunovsky showed complete coincidence and confirmed the correctness of the theoretical positions and equivalence of the nonlinear and linear mathematical models. **Conclusions.** Specialized software has been developed for automating analytical transformations of the geometric control theory, for solving systems of partial differential equations, for defining transformation functions connecting variables of linear and nonlinear models. A number of objects were modeled that showed the operability of the software.

**Keywords:** software, Brunovsky's form, mathematical model, neural networks, geometrical control theory.

М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев, В. В. Скородєлов

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

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ СИНТЕЗУ УПРАВЛІНЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО СТРУМУ

Розглянуті питання розробки та дослідження моделей для синтезу систем керування електроприводом змінного струму дизель-поїзду. Проведено огляд літературних джерел на задану тематику та аналіз існуючих підходів до розв'язання найпоширеніших задач у даній галузі. Розглянуті системи керування з використанням алгоритмів векторного управління. Побудовані математичні моделі досліджуваних об'єктів, проведено моделювання їхнього функціонування. Отримані аналітичні співвідношення, які можуть бути використані для розробки структури САР електроприводу дизель-поїзда і розрахунку її параметрів при задані певного критерію якості з урахуванням певного його завантаження. Синтезовано закони управління, які забезпечують стійкий розгін дизель-поїзда в різних точках тягової характеристики і при цьому виконуються вимоги щодо точності приведення об'єкта управління в задану точку фазового простору і якості перехідних процесів.

**Ключові слова:** синтез систем керування, електропривод змінного струму, дизель-поїзд, алгоритми векторного управління, математична модель, закони управління.

### Вступ

Завдання розробки моделей для синтезу системи керування тяговим електроприводом змінного струму є складовою частиною загального завдання створення оптимальної системи керування транспортними засобами, що забезпечує виконання графіка руху у відповідності заданому критерію оптимальності. Останніми роками вирішення цих завдань пропонується виконувати з використанням сучасних комп'ютерних технологій, в основу яких покладено методи математичного моделювання та аналізу і синтезу складних технічних систем. Тому розробка оптимальних систем керування та моделей для їх дослідження є актуальною задачею.

**Постановка задачі і аналіз відомих публікацій.** В даний час значна увага при розробці та вдосконаленні сучасних видів рухомого складу приділяється електропередачам з електроприводом змінного струму та їх системам керування, що забезпечують функціонування як їх самих, так і підсистем окремо, зокрема підсистеми електроприводу змінного струму з частотним способом керування асинхронним двигуном. Ця тенденція має місце не тільки в Україні, але і країнах ближнього і далекого зарубіжжя [1]. На сьогодні поряд з частотним способом керування все більшої уваги приділяється розробкам систем керування на основі алгоритмів векторного управління [2 – 10]. Ці алгоритми активно впроваджуються у високоякісних електроприводах трифазного струму. В алгоритмах керування закладена ідея орієнтування потоку асинхронного двигуна. З точки зору математичної моделі ідея полягає в приведенні системи рівнянь трифазного асинхронного двигуна [2, 4, 10] до ортогональної системи координат d-q, що обертається із швидкістю вектора потоку ротора, в якій змінні представляються, як сталі величини постійного струму. З точки зору системи керування – фазу і амплітуду струму статора необхідно регулювати так, щоб складова струму по одній осі, що визначає потік, залишалася постійною. Регулювання моменту здійснюється тільки зміною складової струму по другій осі.

Вхідними параметрами для системи є частота обертання ротора тягового двигуна і момент завдання для забезпечення виконання заданого графіка руху відповідно до необхідного критерію оптимальності. Напруги статора (керуючі впливи) системи рівнянь (математичної моделі) трифазного асинхронного двигуна як в рухомій, так і нерухомій системі координат визначаються по рівняннях векторного управління.

Рішення задачі розроблення оптимальної системи керування електроприводом змінного струму в першу чергу пов'язане зі створенням нелінійних математичних моделей з врахуванням особливостей використання того чи іншого методу синтезу управління, критеріїв оцінки якості функціонування системи керування, проведенням комплексних досліджень динаміки електромеханічної системи електроприводу. Для рішення завдань оптимального керування присвячено значне число публікацій [6], де для синтезу використовується математичне моделювання, сучасні методи теорії автоматичного керування та оптимізації, комп'ютерні технології. В [6] пропонується ряд методів синтезу управління та математичні моделі електроприводу змінного струму, які можуть бути використані при розробці систем управління з урахуванням вибраного критерію оптимальності. Як правило, задовільний результат отримується при синтезі оптимальних систем керування для об'єктів, які описуються системою диференціальних рівнянь не вище третього порядку. Для систем вищих порядків можливо використовувати комбінований метод знаходження управління. Він зводиться до наступного. На першому етапі з використанням спрощеної моделі електроприводу знаходиться загальний вид управління. На другому – задаються закони можливих управління та в процесі дослідження уточнюються їх види та параметри системи керування за допомогою повної математичної моделі.

**Метою даної роботи** є розроблення математичних моделей для синтезу системи керування електроприводом змінного струму з використанням алгоритму векторного управління, проведення досліджень моделей синтезованих управління, отримання якісних



характеристик роботи систем керування в процесі моделювання з використанням пакету MATLAB.

### Основна частина

Вихідними змінними для даного об'єкту управління (дизель-поїзда з електроприводом змінного струму) є швидкість руху  $V$  і пройдений шлях  $S$ . За відсутності боксування швидкість руху пропорційна кутовій електричній швидкості обертання ротора двигуна  $\omega$ . Рівняння руху має вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1(M_t - M_c), \quad (1)$$

де  $M_t$  – тяговий момент дизель-поїзда;  $K_1 = p/J_t$ ;  $J_t$  – момент інерції дизель-поїзда;  $M_c$  – момент опору руху, який згідно правил тягових розрахунків, знаходиться згідно виразу:

При номінальному завантаженні  $M_c = M_{ch}$ :

$$M_c = 1299(1.1 + 0.012 * 0.1545 \omega) \text{ (Нм)},$$

або  $M_c = 1429 + 2.41 \omega \text{ (Нм)}. \quad (2)$

За умови, що тяговий момент дизель-поїзду здійснюють чотири двигуни, то рівняння руху матиме вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1(4M_d * i - M_c),$$

де  $M_d$  – електромагнітний момент двигуна;  $i$  – передавальне число редуктора ( $i = 3.69$ ).

З урахуванням рівняння (2), отримаємо:

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1(K_2 M_d - 1429 - 2.41\omega) = K_1(K_2 M_d - K_3 - K_4\omega), \quad (3)$$

де  $K_2 = 14.76$ ;  $K_3 = 1429$ ;  $K_4 = 2.41$ .

або  $\frac{d\omega}{dt} = K_5 M_d - K_6\omega - K_7, \quad (4)$

де  $K_5 = K_1 K_2 = 0.000915$ ;  $K_6 = K_1 K_4 = 0.00015$ ;  $K_7 = K_1 K_3 = 0.089$ .

Можемо записати:

$$\frac{dx_1}{dt} = K_5 M_d - K_6 x_1 - K_7. \quad (5)$$

В результаті отримали диференціальне рівняння першого порядку, яке описує динаміку руху дизель-поїзда при номінальному завантаженні. В якості управління виступає електромагнітний момент тягового двигуна  $M_d$ . Для його визначення використаємо модель тягового двигуна у вигляді системи диференціальних рівнянь, де для формування напруги живлення та її частоти використовується алгоритм векторного управління.

Згідно [4, 10], за умови, якщо швидкість обертання координат  $\omega_k$  співпадає із швидкістю вектора потоку ротора  $\omega_\Psi$  ( $\omega_k = \omega_\Psi$ ), то вектор потокозчеплення ротора  $\Psi_r$  відображається на вісі 1 своїм модулем  $\Psi_{rm}$ , а його проекція на вісь 2 дорівнює нулю і

рівняння, що описують динаміку електромагнітних процесів тягового двигуна, матимуть вигляд [2]:

$$U_{s1} = \frac{d\Psi_{s1}}{dt} - \Psi_{s2}\omega_\Psi + R_s I_{s1}; \quad (6)$$

$$U_{s2} = \frac{d\Psi_{s2}}{dt} + \Psi_{s1}\omega_\Psi + R_s I_{s2}; \quad (7)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{rm}}{dt} + R_r I_{r1}; \quad (8)$$

$$0 = (\omega_\Psi - p\omega)\Psi_{rm} + R_r I_{r2}; \quad (9)$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2}, \quad (10)$$

де  $\Psi_{rm}$  – модуль вектора потоку ротора;  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{r1}$ ,  $I_{r2}$  – відповідно проекції на вісі координат струмів статора і ротора;  $R_s$ ,  $R_r$  – відповідно активні опори обмоток статора і ротора ТАД;  $m$  – число фаз;  $p$  – число пар полюсів;  $K_r$  – коефіцієнт зв'язку ротора;  $\omega$  – швидкість обертання ротора;  $\omega_s$  – швидкість вектора напруги статора;  $\omega_\Psi$  – швидкістю вектора потоку ротора.

Використовуючи рівняння зв'язку [2]

$$\Psi_r = I_r L_r + I_s L_m; \quad \Psi_s = I_s L_s + I_r L_m,$$

отримаємо:

$$U_{s1} = \frac{dI_{s1}}{dt} L_s' + K_r \frac{d\Psi_{r1}}{dt} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi + R_s I_{s1}; \quad (11)$$

$$U_{s2} = \frac{dI_{s2}}{dt} L_s' + I_{s1} L_s' \omega_\Psi + K_r \Psi_{rm} + R_s I_{s2}; \quad (12)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{rm}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} K_r R_r; \quad (13)$$

$$0 = \beta \Psi_{rm} - I_{s2} K_r R_r; \quad (14)$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2}, \quad (15)$$

де  $L_s' = L_s - L_m^2/L_r$ ,  $K_r = L_m/L_r$ .

Використовуючи рівняння (11) і (12) і рівняння зв'язку для системи управління з регулюванням напруги живлення, знаходимо співвідношення, за допомогою яких визначаються проекції напруги живлення ТАД по кожній із осей при відомій її частоті.

$$U_{s1} = R_s I_{s1} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi; \quad (16)$$

$$U_{s2} = R_s I_{s2} + \omega_\Psi \Psi_{rm} \left( \frac{L_s'}{L_m} + K_r \right). \quad (17)$$

Момент тягового двигуна  $M_d$  знаходиться згідно рівняння (15) по відповідним значенням потокозчеплення  $\Psi_{rm}$  і струму  $I_{s2}$ . Для визначення потокозчеплення  $\Psi_{rm}$  використаємо диференціальне рівняння (13). Тяговий момент, який як управління в рівнянні (5), визначається фазовою змінною  $\Psi_{rm}$  і проекцією вектора струму статора - струмом  $I_{s2}$ .

Змінна  $\Psi_{rm}$ , згідно диференційного рівняння (13), визначається струмом  $I_{s1}$ . В результаті, в якості управлінь, можемо вибрати проекції вектора струму статора - струми  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$ .

З урахуванням динамічних процесів для визначення проекції потоку ротора  $\Psi_{rm}$  використаємо рівняння (13) у вигляді:

$$\frac{d\Psi_{rm}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\Psi_{rm} + I_{s1}\frac{L_m R_r}{L_r}. \quad (18)$$

При заданих параметрах ТАД отримаємо:

$$\frac{d\Psi_{rm}}{dt} = -0.771\Psi_{rm} + 0.0668I_{s1}. \quad (19)$$

Аналогічно із рівнянням (5) рівняння (19) для оптимізаційної моделі запишемо у вигляді:

$$\frac{dx_2}{dt} = -0.771x_2 + 0.0668I_{s1}. \quad (20)$$

Для синтезу управлінь об'єкт дослідження представляється моделлю у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\dot{X}_1 + a_{11}X_1 - a_{12}X_2U_1 + 0.089 = 0, \quad (21)$$

$$\dot{X}_2 + a_{21}X_2 - a_{22}U_2 = 0. \quad (22)$$

де  $X_1, X_2, \dot{X}_1, \dot{X}_2$  – відповідно фазові змінні та їх похідні;  $U_1, U_2$  – управління;  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$  – коефіцієнти, які визначаються параметрами системи.

Для системи, що досліджується:

$$X_1 = \omega; X_2 = \Psi_{rm};$$

$$a_{11} = 0.00015; a_{12} = 0.004; a_{21} = 0.771;$$

$$a_{22} = 0.068; U_1 = I_{s2}; U_2 = I_{s1}.$$

Оскільки математична модель об'єкта з використанням алгоритму векторного управління за певних обмежень може бути представлена системою диференціальних рівнянь другого порядку (21) – (22), то для синтезу управлінь пропонується використати один з методів варіаційного числення – рішення загальної задачі Лагранжа.

При рішенні задачі оптимізації, використовуючи метод варіаційного числення, як рішення загальної задачі Лагранжа, математична модель об'єкта задається у вигляді системи диференціальних рівнянь у вигляді:

$$\dot{X}_j - \psi_j(X_1, X_2, \dots, X_n, U_j) = 0, \quad (23)$$

де  $X_j$  – змінні співвідношення;  $U_j$  – управління,  $i = \overline{1, n}$ .

Відомі початкові і кінцеві стани об'єкту:  $X_i(0), X_i(T)$ .

Заданий критерій оптимальності:

$$J = \int_{t_0}^T G(X_1, X_2, \dots, X_n, U_j) dt. \quad (24)$$

Відомі області допустимих управлінь.

Рівняння об'єкту розглядаються як рівняння зв'язків в загальній задачі Лагранжа варіаційного числення. Критерієм оптимальності є функціонал, що мінімізується.

Якщо на управління і стани ніяких обмежень не накладено, то рішення задачі оптимізації шукається по аналогії з методами варіаційного числення. З цією метою складається допоміжний функціонал:

$$J_1 = \int_{t_0}^T [G + \sum_{j=1}^n \lambda_j(t)(\dot{X}_j - \psi_j)] dt = \int_{t_0}^T G_1 dt. \quad (25)$$

Відносно функцій  $U_j, X_j, \lambda_j$ , складаються рівняння Ейлера:

$$\frac{dG_1}{dU_i} - \frac{d}{dt} \frac{dG_1}{d\dot{U}_i} = 0. \quad (26)$$

Тут в рівнянні (26) під  $U_i$  розуміються функції  $U_j, X_j, \lambda_j$ .

В результаті отримаємо систему рівнянь по числу невідомих  $U_j(t), X_j(t), \lambda_j(t), j = \overline{1, n}$ .

Розглянемо розробку моделі оптимізації відносно енергетичних витрат при розгоні дизель-поїзда за заданий час і виконання граничних умов по швидкості і пройденому шляху.

Функціонал, що мінімізує енергетичні витрати, можливо задати у вигляді:

$$J = \int_{t_0}^T (U_1^2 + U_2^2) dt, \quad (27)$$

де  $U_1, U_2$  – управління,  $t_0, T$  – початковий і кінцевий терміни часу розгону.

Тоді нова підінтегральна функція  $G_1$  описується співвідношенням:

$$G_1 = U_1^2 + U_2^2 + \lambda_1(\dot{X}_1 + a_{11}X_1 - a_{12}X_2U_1 + 0.089) + \lambda_2(\dot{X}_2 + a_{21}X_2 - a_{22}U_2). \quad (28)$$

На підставі рівняння Ейлера (26) складемо співвідношення для знаходження рівнянь  $U_1, U_2$ .

Для  $U_1$ :

$$\frac{dG_1}{dU_1} = 2U_1 - a_{12}\lambda_1X_2 = 0. \quad (29)$$

Для  $U_2$ :

$$\frac{dG_1}{dU_2} = 2U_2 - a_{22}\lambda_2 = 0. \quad (30)$$

Тоді управління  $U_1, U_2$  знаходяться як:

$$U_1 = a_{12}\lambda_1X_2 / 2; \quad (31)$$

$$U_2 = a_{22}\lambda_2 / 2. \quad (32)$$

Невідомими є  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ . Для визначення  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ ,  $X_1$  та  $X_2$  складемо рівняння Ейлера згідно (26).

$$\frac{dG}{d\lambda_1} = \dot{X}_1 + a_{11}X_1 - a_{12}X_2U_1 + 0.089 = 0; \quad (33)$$

$$\frac{dG}{d\lambda_2} = \dot{X}_2 + a_{21}X_2 - a_{22}U_2 = 0. \quad (34)$$

В результаті отримали аналогічні співвідношення, що відповідають початковим рівнянням (21), (22) для знаходження невідомих  $X_1$  і  $X_2$  та описують динаміку об'єкта управління, що досліджується.

Аналогічно знаходяться рівняння для визначення невідомих  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ .

Для визначення невідомих  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\dot{\lambda}_1 - a_{11}\lambda_1 = 0; \quad (35)$$

$$\dot{\lambda}_2 + \lambda_1 a_{12}U_1 - a_{21}\lambda_2 = 0. \quad (36)$$

В результаті отримали систему диференціально-алгебраїчних рівнянь для знаходження управлінь  $U_1$  і  $U_2$ .

Оскільки з однієї сторони система рівнянь нелінійна, а з другої знаходження невизначених множників Лагранжа  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  потребує для їх знаходження багатократного перебору варіантів, то рішення задачі знаходження управлінь, які б задовольняли критерію оптимізації згідно з виразом (27), можливо шляхом моделювання.

Для практичного визначення закону зміни невідомих  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  і знаходження управлінь  $U_1$  і  $U_2$  пропонується наступний підхід. Згідно рівняння (30) управління  $U_1 = a_{12}\lambda_1 X_2 / 2$ ,  $U_1$  – це струм  $I_{s2}$ , який визначає тяговий момент. Тоді із математичної моделі (10) виходить:

$$I_{s2} = 2M_d / (mpK_r) \Psi_{rm}. \quad (37)$$

При максимально-допустимому моменті (паспортні дані) ( $M_d = 4800$  Нм) і умові, що  $\Psi_{rm} = 1$  В та параметрах ( $m=3$ ,  $p=3$ ,  $K_r=0.982$ ), згідно (37) буде досягатися максимально-допустиме значення струму  $I_{s2}$  ( $I_{s2} = 960$  А).

Використовуючи рівняння (30) можемо знайти межі зміни змінної  $\lambda_1$ .

$$\lambda_{1\max} = 2I_{s2} / a_{12} = 480000.$$

При  $\Psi_{rm} = \text{const}$  (за рахунок стабілізації струму), згідно досліджень, форма зміни моменту  $M_d$  має експоненціальний характер (див. рис. 2), то закон зміни  $\lambda_1$  можемо представити у вигляді:

$$\lambda_1 = B (1 - e^{-kt}), \quad (38)$$

де  $B = 480000$  (визначається паспортними даними двигуна),  $k = 0.2$  (значення  $k$  в процесі досліджень може уточнитись).

Для певної завантаженості управління  $U_1$  буде визначатись згідно виразу:

$$U_1 = a_{12}B (1 - e^{-kt}) X_2 / 2. \quad (39)$$

Згідно (32) управління  $U_2 = a_{22}\lambda_2 / 2$ .  $U_2$  – це струм  $I_{s1}$ , який визначає поточозчеплення.

Визначимо  $\lambda_2$  аналогічно як і  $\lambda_1$ . Із процесів моделювання слідує, що характер зміни  $U_2$  (це практично  $\Psi_{rm}$ ) теж носить експоненціальний характер. Реально максимальне значення  $\Psi_{rm}$  не більше 6 (В).

Із рівняння (13) за умови закінчення перехідного процесу можемо записати співвідношення для визначення струму  $I_{s1}$ .

$$I_{s1} = \Psi_{rm} / L_m. \quad (40)$$

Тоді  $I_{s1\max} = 60$ (А).

Із рівняння (32) знайдемо  $\lambda_2$ :

$$\lambda_2 = 2 U_2 / a_{22}. \quad (41)$$

В загальному вигляді:

$$\lambda_2 = (2\Psi_{rm} / L_m a_{22})(1 - e^{-kt}), \quad (42)$$

де  $k$  – темп наростання сигналу  $\Psi_{rm}$  (початкове значення коефіцієнта  $k = 0.2$ ).

Управління  $U_2$  буде визначатись наступним співвідношенням:

$$U_2 = (\Psi_{rm} / L_m)(1 - e^{-kt}). \quad (43)$$

Для певної завантаженості управління визначаються згідно виразу:

$$U_1 = a_{12}B (1 - e^{-kt}) X_2 / 2; \quad (44)$$

$$U_2 = (X_2 / L_m)(1 - e^{-kt}), \quad (45)$$

де  $B = 480000$ ,  $k = 0.2$  (значення  $k$  в процесі досліджень може уточнитись),  $L_m$  – індуктивність контура намагнічування ( $L_m = 0.0917$  Гн).

Перевірка законів управління досліджувалась наступним чином.

Відповідно до синтезованих законів управління (44) – (45) системою керування формувалися згідно системи диференціальних рівнянь (21) і (22) частота обертання ротора ТАД, поточозчеплення  $\Psi_{rm}$  та момент ТАД  $M_d$ . На їх основі визначалися проєкції вектора напруги живлення ТАД  $U_{s1}$  і  $U_{s2}$  та його частота  $\omega_s$ , які є вхідними впливами для моделі об'єкта дослідження. Об'єкт дослідження – це електромеханічна частина електроприводу дизель-поїзда з тяговими двигунами змінного струму, математична модель якого представлялась у вигляді системи диференціальних рівнянь п'ятого порядку в рухомій системі координат d-q [3, 6].

Момент опору руху  $M_c$ , згідно правил тягових розрахунків, задавався згідно рівняння (2).

На рис. 1 і 2 наведено результати моделювання розробленої системи у вигляді перехідних процесів поточозчеплень  $\Psi_{rm}$  та електромагнітного моменту ТАД  $M_d$ , що демонструють роботу моделі при певному значенні управлінь  $U_1$  і  $U_2$  в системі керування і як реакції на управління об'єкта дослідження.

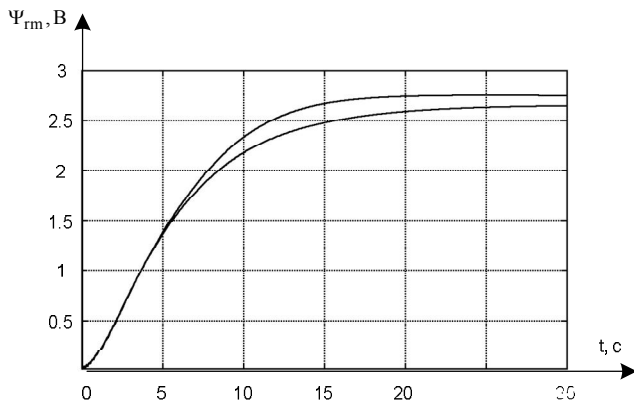


Рис. 1. Процеси зміни законів управління за потокозчепленням

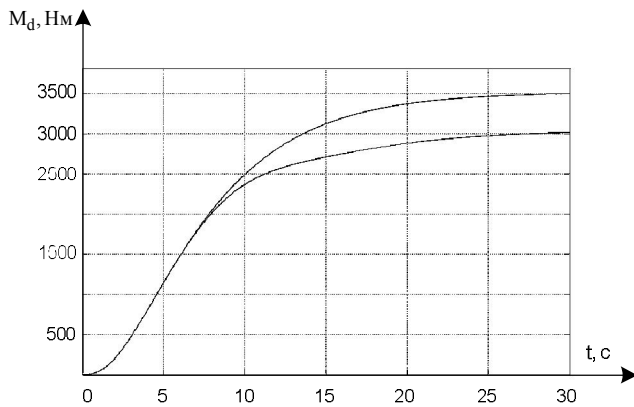


Рис. 2. Процеси зміни законів управління за моментом ТАД

На рис. 3 приведені перехідні процеси у вигляді осцилограм як різниці сигналів завдання частоти обертання ротора і реакції електроприводу (вихідного сигналу моделі електромеханічної системи частоти обертання ротора), що демонструють роботу моделі при певному значенні управлінь  $U_1$  і  $U_2$ .

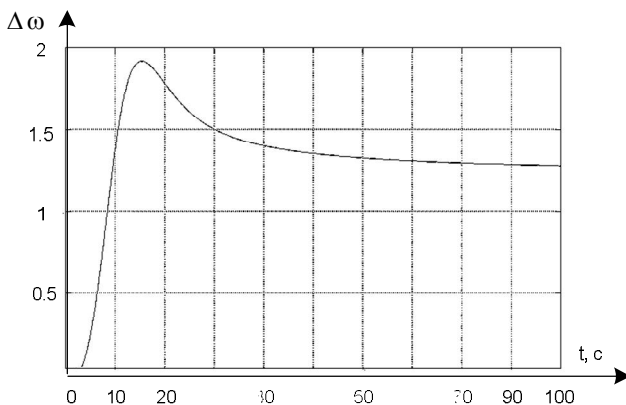


Рис. 3. Процеси зміни різниці швидкостей завдання та обертання ТАД

Відповідно до цих процесів керування по потокозчепленню отримані показники витрат енергії при розгоні дизель-поїзду з різними показниками навантаженості, швидкості руху та пройденого шляху за певний проміжок часу. Як критерій оптимальності

використовувався критерій мінімуму енергетичних витрат при виконанні обмежень по величині пройденого шляху і швидкості в кінцевий момент часу. Розглядалися різні режими роботи електроприводу, зокрема, розгін дизель-поїзта за заданий час  $t$  і оцінювалися отримані характеристики (швидкість, пройдений шлях і енергетичні витрати). Результати дослідження приведені в табл. 1.

Як слідує із таблиці за умови досягнення швидкості  $V = 58.49$  км/год і пройденого шляху  $S = 749.7$  м значення управлінь

$$U_1 = 250 \text{ А}, U_2 = 48.06 \text{ А}$$

має перевагу до управління  $U_1 = 300 \text{ А}, U_2 = 40 \text{ А}$ .

При цьому економія енергії становить 1.67%.

Таблиця 1 – Результати аналізу функціонування моделі ( $p/J = 0/000071$ ;  $t = 100$  с)

$U_1, \text{ А}$	$U_2, \text{ А}$	$V, \text{ км/год}$	$S, \text{ м}$	$P \cdot 10^4, \text{ кВт} \cdot \text{с}$	$P/S$
300	30	43.66	561.3	1.042	18.56
250	30	36.15	464.4	0.715	15.4
200	30	28.64	367.6	0.453	12.32
150	30	21.4	270.9	0.253	9.34
300	25	36.28	467.6	0.756	16.17
250	25	29.99	386.2	0.517	13.40
200	25	23.71	304.9	0.323	10.59
150	25	17.44	223.8	0.180	8.04
300	35	51.07	655.7	1.38	21.05
<b>300</b>	<b>40</b>	<b>58.49</b>	<b>750.4</b>	<b>1.773</b>	<b>23.63</b>
300	45	65.91	846.2	2.22	26.23
250	35	42.32	543.1	0.951	17.51
250	40	48.51	622	1.225	19.69
250	45	54.7	701.1	1.538	21.94
250	50	60.89	780.3	1.892	24.25
250	48	58.41	748.6	1.746	23.32
<b>250</b>	<b>48.05</b>	<b>58.47</b>	<b>749.4</b>	<b>1.749</b>	<b>23.34</b>
<b>250</b>	<b>48.06</b>	<b>58.49</b>	<b>749.7</b>	<b>1.75</b>	<b>23.34</b>

Виходячи з проведених результатів дослідження можна зробити висновок, що розроблена модель на основі використання алгоритму векторного керування електроприводом та отримані закони управління, дозволяють оптимізувати роботу енергетичної системи дизель-поїзта в процесі розгону з урахуванням його навантаженості, забезпечуючи при цьому виконання заданих граничних умов, а також проводити дослідження систем керування в замкнутій системі управління.

### Висновки

1. Розроблена математична модель електроприводу дизель-поїзта може бути використана для дослідження і уточнення параметрів системи управління з метою оптимізації енергетичних показників.

2. Отримані аналітичні співвідношення можуть бути використані для розробки структури САР електроприводу дизель-поїзта і розрахунку її параметрів при задані певного критерію якості з урахуванням певної навантаженості.

3. Запропонована оптимізаційна математична модель, закони управління, аналітичні співвідношення для визначення параметрів САР реалізовані у вигляді машинної моделі. Проведені дослідження показали перспективність такого підходу при розробці сучасних оптимальних систем управління електроприводом дизель-поїздів з тяговими двигунами змінного струму.

4. На підставі проведених досліджень і порівнянні результатів отриманих на моделі в динамічних режимах і за різних умов розгону дизель-поїзда (величини завантаженості, значення управлінь) встанов-

лено, що процес розгону при запропонованих законах управління стійкий. При цьому виконуються вимоги щодо точності приведення об'єкта управління в задану точку фазового простору і якості управління.

5. Розроблена оптимізаційна модель на основі алгоритму векторного керування ТАД та запропоновані закони управління дозволяють оптимізувати роботу енергетичної системи дизель-поїзду в процесі розгону, забезпечуючи при цьому виконання заданих граничних умов, а також проводити дослідження систем керування в замкнутій системі управління.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Horstmann D. 100 Jahre Entwicklung der Antriebsstechnik für elektrische Bahnen. Teil 2 / Daniel Horstmann, Rudolf Wagner, Wolf-Dieter Weigel // Elek. Bahnen. – 2003. – No 7. – P. 338-345.
1. 2. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями : Учебное пособие / А.А. Усольцев СПб: СПбГУ ИТМО, 2002. – 43 с.
2. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
3. Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
4. Bose Bimal K. Modern Power Electronics and AC drives / Bimal K. Bose. – Pr. Hall PTR: Prentice-Hall Inc. – 2002. – 712 p.
5. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю.]. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
6. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung. Die Grundlage für die Transvektor-Reglung von Drehfeldmaschine / F. Blaschke // Siemens Zeitschrift. – 1971. – № 45. – Н. 10.
7. Volkov A.V. Asynchronous motor drive based on self-excited current inverter with switched-off thyristors and provided with redicting relay and vector regulation of stator current / A.V. Volkov, I.A. Kosenko // Elektrotehnika. – 2008. – No 10. – P. 6-17.
8. Пересада С.М. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, В.С. Бовкунович // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 1. – С. 60-66.
9. Заполовський М.Й. Синтез управлінь для оптимізації динамічних процесів електроприводу змінного струму / М.Й. Заполовський, В.В. Скороделов, М.В. Мезенцев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Вип. 4(50). Полтава. 2018. С. 38-41.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г. А. Кучук,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 10.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.09.2019

### Математическая модель для синтеза управлений электроприводом переменного тока

Н. И. Заполовский, Н. В. Мезенцев, В. В. Скороделов

Рассмотрены вопросы разработки и исследования моделей для синтеза систем управления электроприводом переменного тока дизель-поезда. Проведен обзор литературных источников по заданной тематике и анализ существующих подходов к решению наиболее распространенных задач в данной области. Рассмотрены современные варианты с использованием алгоритмов векторного управления. Построены математические модели, проведено моделирование их функционирования. Полученные аналитические соотношения, которые могут быть использованы для разработки структуры САР электропривода дизель-поезда и расчета ее параметров при задании определенного критерия с учетом определенной загруженности состава. Синтезированы законы управления, обеспечивающие устойчивый разгон дизель-поезда в различных точках тяговой характеристики и при этом выполняются требования по точности приведения объекта управления в заданную точку фазового пространства и качества переходных процессов.

**Ключевые слова:** синтез систем управления, электропривод переменного тока, алгоритмы векторного управления, математическая модель, законы управления.

### Mathematical model for the synthesis of controls for AC electric drive

M. Zapolovsky, M. Mezentsev, V. Skorodelov

The issues of development and research of models for the synthesis of control systems for AC electric drive of an alternating current of a diesel train are considered. A review of literary sources on a given topic and an analysis of existing approaches to solving the most common problems in this area are carried out. Modern options using vector control algorithms are considered. Mathematical models are constructed, modeling of their functioning is carried out. The obtained analytical relations that can be used to develop the structure of the automatic control system of the electric drive of the diesel train and calculate its parameters when specifying a certain criterion taking into account a certain workload of the train. Control laws have been synthesized that provide stable acceleration of a diesel train at various points of the traction characteristic, while the requirements for the accuracy of bringing the control object to a given point in the phase space and the quality of transient processes are fulfilled.

**Keywords:** synthesis of control systems, AC electric drive, vector control algorithms, mathematical model, controls.

В. Б. Кононов, Ю. І. Кушнерук, А. А. Назаренко

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИБОРУ ТЕСТУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

**Предметом** вивчення в статті є питання проектування принципової схеми пристрою тестування інтегральних мікросхем. **Метою статті** є дослідження проектування принципової схеми пристрою, якій підключає до комп'ютера, призначеного для тестування й визначення типу інтегральних мікросхем методом сигнатурного аналізу мікросхем, що дозволяє робити перевірку всіх статичних режимів роботи цих інтегральних мікросхем. **Завдання** – за допомогою обраних складових принципової схеми пристрою, а саме: вузлу вхідних регістрів; пристрою узгодження по входу; пристрою узгодження по виходу; керуючого пристрою; блоку живлення; пристрою комутації живлення; джерела живлення пристрою дослідити їх принцип дії, за допомогою якого обґрунтувати технічні рішення, впровадження яких в практику вимірювання дозволить здійснювати перевірку всіх статичних режимів роботи інтегральних мікросхем. **Висновки:** запропоновані технічні рішення, що отримані при дослідженні проектування принципової схеми пристрою тестування інтегральних мікросхем надають можливість обрати найбільш корисну принципову схему пристрою, якій підключає до IBM - сумісного комп'ютера, призначеного для тестування й визначення типу інтегральних мікросхем.

**Ключові слова:** інтегральні мікросхеми, проектування принципової схеми, живлення вузла, максимально споживаний струм.

### Вступ

**Постановка задачі.** При проведенні дослідження структури системи контролю інтегральних мікросхем бажано розуміти технічні вимоги, що притаманні при тестуванні інтегральних мікросхем на зразках техніки. При цьому бажано розуміти, що радіодеталі, що навіть пройшли ОТК на заводі-виробнику, мають деякий відсоток відмови в процесі транспортування, монтажу або експлуатації, що спричиняє додаткові витрати робочого часу й засобів для їхнього виявлення й заміни (причому більшу частину часу займає саме виявлення несправних деталей). Для забезпечення повної впевненості в працездатності тієї або іншої радіодеталі, необхідно перевіряти її на справність безпосередньо перед зборкою вузла або виробу ("вхідний контроль"). Якщо більшість радіодеталей можна перевірити звичайним омметром, то для перевірки інтегральної мікросхеми потрібно набагато більше асортименти устаткування, а саме пристрій, що дозволяє оперативно перевіряти працездатність інтегральних мікросхем, з можливістю перевірки як нових, так і вже демонтованих із плати мікросхем. Тому питання, що пов'язане із дослідженням проектування принципової схеми пристрою тестування інтегральних мікросхем є актуальним науково-практичним завданням

**Аналіз літератури.** Принципи й організаційні основи метрологічного забезпечення, а також роль й місце метрологічного забезпечення Збройних Сил України, викладено в наказах [1– 11]. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості викладено в статті [1]. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення викладено в статтях [2, 3]. Нажаль в цих джерелах питання, які пов'язані з дослідженням проектування принципової схеми пристрою тестування інтегральних мікросхем, не розглядалися.

**Метою статті** є дослідження проектування принципової схеми пристрою, якій підключає до комп'ютера, призначеного для тестування й визначення типу інтегральних мікросхем методом сигнатурного аналізу мікросхем ТТЛ і КМОП, що дозволяє робити перевірку всіх статичних режимів роботи цих інтегральних мікросхем.

### Основний матеріал

Першим кроком при проектуванні принципової схеми є обрання вузлу вхідних регістрів. Даний вузол – 32-розрядний запам'ятовувальний регістр із ТТЛ-рівнями, без Z-стану, що використовує 8 вхідних ліній даних і кілька ліній керування на 32 вихідні лінії. Пристрій узгодження за входом забезпечує узгодження між ТТЛ-виходами регістрів і входами випробуваної мікросхеми як за напругою (приведення рівнів ТТЛ (КМОП або ТТЛ)), так і за струмом. Максимальні вхідні струми для мікросхем ТТЛ логіки дорівнюють: струм "0" - 2ма, струм "1" - 0.1 ма. Напруга +U<sub>mc</sub> - напруга живлення випробуваної мікросхеми. Для ТТЛ мікросхем вона дорівнює +5в. Для КМОП мікросхем – +9в. За допомогою її формується вхідний струм "1". Напруга -U<sub>mc</sub> залежить від обраного типу мікросхеми (задається користувачем, виставляється за допомогою одного біта керуючого регістра). Для ТТЛ мікросхем вона дорівнює 9.3в. Для КМОП мікросхем – 1в. Діоди потрібні для обмеження потенціалу U<sub>вх</sub><sup>0</sup>. (тобто цей потенціал не повинен бути нижче потенціалу загального проведення, оскільки при цьому можливий вихід з ладу мікросхем КМОП логіки). Даний вузол інвертує значення вхідного сигналу. Рознімання ХЗ є панеллю для вставки випробуваної мікросхеми. Пристрій узгодження за виходом служить для узгодження ТТЛ або КМОП рівнів, зчитуваних з випробуваної мікросхеми у ТТЛ-рівні для подачі на вихідні мультиплектори, інвертує вхідний сигнал.

Вихідний мультиплектор – перетворювач для передачі даних з 32-х вхідних ліній на 4 вихідні лінії. Рівні сигналів - ТТЛ. На виходах мультиплексо-

ра з'являються дані з відповідних входів. Керуючий пристрій служить для вибірки необхідних регістрів і мультиплексорів при записі даних у регістри й зчитуванні даних з мультиплексорів. Є дешифратором. Блок живлення забезпечує цифрове регулювання напруги живлення випробуваної мікросхеми, цифрове керування обмеженням споживаного струму з малим кроком (завдяки чому можливо його вимір з достатньою точністю), захист від к/з у ланцюзі навантаження. Вузол працює наступним чином: а) регулювання напруги; б) регулювання споживаного струму.

Як приклад, детально розглянемо пристрій комутації живлення. Даний вузол забезпечує комутацію напруги живлення, що подається на входи випробуваної мікросхеми. За допомогою його виро-

бляється також перемикання  $-U_{mc}$  (-1В або -9.3В, для КМОП і ТТЛ логіки відповідно, залежно від обраного типу мікросхеми) і включення регульованого стабілізатора напруги. Пристрій працює таким чином. Аналогічно запису у вхідні регістри, у регістр DD6 програмно записується 8-бітне число. Далі здійснюється комутація "+" живлення випробуваної мікросхеми та комутація GND, комутація  $-U_{mc}$  та включення напруги живлення. Джерело живлення пристрою (рис. 1) забезпечує живлення всіх інших вузлів проєктованого пристрою. Перед початком проєктування схеми необхідно з'ясувати максимально споживаний струм за кожною із напруг живлення ( $I_{потр.}^{+5В}$ ,  $I_{потр.}^{-10В}$ ,  $I_{потр.}^{-0.7В}$ ,  $I_{потр.}^{+U_{вх}}$ ). Максимально споживаний струм  $I_{мс-потр.макс}$  дорівнює 256 ма.

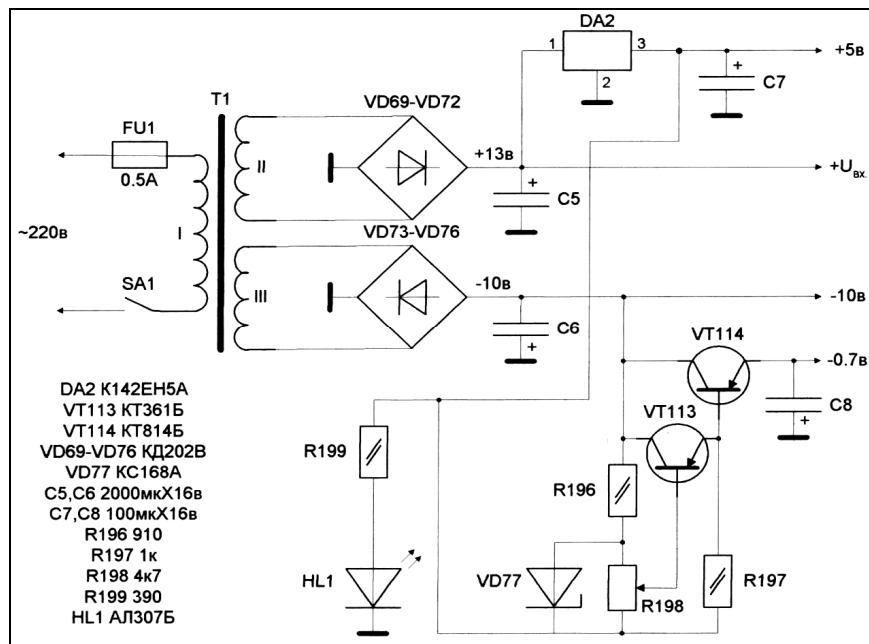


Рис. 1. Джерело живлення

Для нормального функціонування пристрою необхідні такі напруги живлення: +5В(400ма), -10В(100ма), -0.7В(300ма), +13В(350ма). Напруги +13В і -10В можуть бути випрямленими, згладженими, але нестабілізованими (тому що в схемі блоку живлення з +13В далі виходять стабілізовані, а -10В служить лише для забезпечення  $I_{вх}^0$  на входах випробуваної мікросхеми). Тому необхідно двохполярне джерело живлення з напругами +13В і -10В, з яких за допомогою додаткових стабілізаторів виходять напруги +5В і -0.7В. При цьому струми споживання по відповідних напругах будуть підсумуватися. Тобто від плеча +13В буде споживатися струм порядку  $400+350=750$ ма, а від плеча -10В відповідно  $100+300=400$ ма. Для джерела живлення потрібен трансформатор Т1 з 2-ма вторинними обмотками, 2 діодних випрямних мости (VD69-VD76) і 2 згладжуючі конденсатори. Під ці вимоги підходить трансформатор ТПП-207- 127/220-50. В якості стабілізатору +5В обрана мікросхема КР142ЕН5А за типовою схемою включення, як стабілізатор -0.7В – регульована схема на двох транзисторах (VT113, VT114). Причому, у зв'язку з настільки малою на-

пругою, стабілізація виробляється не відносно «землі» (що не вдалося б здійснити у зв'язку із сумарним спаданням напруги на переходах транзисторів порядку), а щодо стабілізованого джерела +5В. Настроювання даного вузла полягає в підстроюванні точного значення напруги -0.7В на виході блоку живлення за допомогою резистору R198.

### Висновки

1. В статті досліджено проєктування принципової схеми пристрою, якій підключає до комп'ютера, призначеного для тестування й визначення типу інтегральних мікросхем методом сигнатурного аналізу мікросхем.
2. Процес проєктування принципової схеми такого пристрою включає в собі обирання: вузлу вхідних регістрів; пристрій узгодження по входу; пристрій узгодження по виходу; керуючий пристрій; блок живлення; пристрій комутації живлення; джерело живлення пристрою.
3. Досліджено принцип дії приладів, із складається принципова схема пристрою, якій підключає до комп'ютера, призначеного для тестування

й визначення типу інтегральних мікросхем. 4. Досліджена принципова схема пристрою, якій підключає до комп'ютера, призначеного для тестування й визначення типу інтегральних мікросхем дозволяє здійснювати перевірку всіх статичних режимів роботи інтегральних мікросхем.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кононов В.Б., Бурцева В.В. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості Системи обробки інформації: зб. наук. пр. ХНУПС. – Вип.1 (147). – Харків, 2017. – С. 88–92.
2. Кононов В.Б. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення //Авиационно-космическая техника и технология. – Харків: НАУ ХАИ—2011.-№ 8 (85) -С.231–234.
3. Кононов В.Б., Науменко А.М., Водолажко О.В., Коваль О.В., Кондрашова І.І. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. - Харків: ХНУПС, 2017. – С. 288.
4. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
5. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускну здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
6. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
7. Кононов В.Б. Застосування електричних вимірювань засобами вимірювальної техніки в умовах проведення АТО: навч. посіб./ В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Коваль та ін.. – Х.:ХНУПС, 2018. – 392 с.
8. Instrumentation and general principles of sensors. Part 1 / В.Б. Кононов, А.М. Науменко та ін. – Х.:ХНУПС, 2018. – 64 с.
9. Організація метрологічного забезпечення військ (сил). Ч. 1 : навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, П. М. Яблонський. – К. : НУОУ, 2009. – 356 с.
10. Організація застосування пересувних засобів метрологічного обслуговування: навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, О. В. Ярошенко. – К.: НУОУ, 2009. – 356 с.
11. Кузнецов І. Б., Марценківський В. Т., Ярошенко О. В., Буяло О. В., Проценко В. О. Удосконалення парку пересувних лабораторій вимірювальної техніки як фактор підвищення оперативності та ефективності метрологічного обслуговування складних систем // Збірник наукових праць КНУ. Вип. 32. – К. : ВІКНУ, 2011. – С. 33–46.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. І. Кондрашов,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 27.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

### Исследование проектирования принципиальной схемы устройства тестирования интегральных микросхем

В. Б. Кононов, Ю. И. Кушнерук, А. А. Назаренко

**Предметом** изучения статьи являются вопросы проектирования принципиальной схемы устройства тестирования интегральных микросхем. **Целью статьи** является проектирования принципиальной схемы устройства, которое подключается к компьютеру для тестирования и определения типа интегральных микросхем методом сигнатурного анализа микросхем, что позволяет делать проверку всех статических режимов работы рассматриваемых интегральных микросхем. При помощи определенных составляющих принципиальной схемы устройства, а именно: узла входных регистров; устройства согласования по входу; устройства согласования по выходу; управляющего устройства; блока питания; устройства коммутации питания; источника питания устройства, исследован их принцип действия. Обоснование технических решений для практики измерений позволяет осуществлять проверку всех статических режимов работы интегральных микросхем. **Вывод:** предложенные технические решения, полученные при проектирования принципиальной схемы устройства тестирования интегральных микросхем дает возможность выбирать наиболее целесообразную принципиальную схему устройства, которое предназначается для тестирования и определения типа интегральных микросхем.

**Ключевые слова:** интегральные микросхемы, проектирование принципиальной схемы, питание узла, максимально использованный ток.

### The study of the design of the principle scheme of the device for testing the integral Microsystems

V. Kononov, Ju. Kushneruk, A. Nazarenko

**The subject** of study in the article is the question of designing a schematic diagram of a device for testing integrated circuits. **The purpose** of this article is to study the design of a schematic diagram of a device that connects to a computer compatible with a computer intended for testing and definition of the type of integrated circuits by the method of signal analysis of microcircuits allows you to check all static operating modes of these integrated circuits. **The problem** solved with the help of the selected components of the principle scheme of the device namely the node of the input registers of the device agreeing the horde of the device to agree on the output of the control device power supply device to investigate the principle of action by which to revolt the technical solutions of the introduction of the practice of measuring permissions to verify all static operating modes of integrated circuits. **The conclusions** of the proposed technical solutions obtained during the study of the design of the principle circuit provide the opportunity to select the most useful principle of the device that connects to the computer designed for testing and definition of the type of integrated circuit.

**Keywords:** integral microcircuit, designing principle, power supply node, maximal consumed current.



А. М. Науменко, О. О. Бабич, Е. О. Короткий

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

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТІВ

**Предметом** вивчення в статті є інформаційно-вимірвальні системи управління об'єктів, які використовуються при вимірюванні різноманітних фізичних величин у процесі експлуатації вимірвальної техніки. **Метою статті** є аналіз методів організації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірвальних систем управління об'єктів та надання рекомендацій щодо практичної реалізації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірвальних систем. **Задача, що вирішується**, – обґрунтування технічних рішень, впровадження яких в практику вимірювання дозволять підвищити метрологічну надійність зразків інформаційно-вимірвальних систем управління об'єктів. В статті розглядається основні терміни та визначення інформаційно-вимірвальних систем, їх класифікація та особливості метрологічного обслуговування, пропозиції щодо спрощення методики розрахунку визначення метрологічних характеристик простих вимірвальних каналів з номінальною нелінійною функцією перетворення, регламентація складу вимірвальних каналів та оформлення результатів повірки даних систем. **Висновки:** запропоновані заходи дозволять підтримувати вимірвальні системи, канали зв'язку, системи управління об'єктів в надійному стані, що в кінцевому випадку приведе до успішного виконання поставлених завдань.

**Ключові слова:** система, метрологічна надійність, вимірвальний канал.

### Вступ

**Постановка задачі.** Комплексне вимірювання значень фізичних величин для оцінки стану об'єктів та управління ними у теперішній час виконується за допомогою інформаційно-вимірвальних систем (ІВС). При цьому метрологічне обслуговування об'єктів, а саме повірка (калібрування) здійснюється через певні міжповірочні інтервали на підставі методів організації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірвальних систем управління об'єктів, що дозволяє підтримати їх якісний метрологічний стан. На основі отриманих результатів вимірювань приймаються рішення про визнання об'єктів придатними до використання або про необхідність їх регулювання та ремонту.

**Аналіз літератури.** Принципи й організаційні основи метрологічного забезпечення, а також роль й місце метрологічного забезпечення Збройних Сил України, викладено в [1–12]. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків контрольно-перевірочної апаратури авіаційної техніки з урахуванням їх важливості викладено в статтях [1, 2]. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірвальної техніки викладено в статті [3].

**Метою статті** є аналіз методів організації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірвальних систем управління об'єктів та надання рекомендацій щодо практичної реалізації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірвальних систем.

### Основний матеріал

Відповідно до ДСТУ (ГОСТ) 8.596 під вимірвальною системою розуміється сукупність вимірвальних, сполучних, обчислювальних компонентів, які утворюють вимірвальні канали й допоміжні пристрої, що функціонують як єдине ціле, призначеної для:

- отримання інформації про стан об'єкту за допомогою вимірвальних перетворень, які в загальному випадку змінюються в часі й розподілені в просторі величин, що характеризують цей стан;
- обробки результатів вимірювань;
- реєстрації та індикації результатів вимірювання і обробки їх результатів;
- перетворення цих даних у вихідні сигнали системи в різних цілях.

Розрізняють інформаційно-вимірвальні системи, що виготовляються серійно, так звані типові інформаційно-вимірвальні системи і системи одиничних екземплярів.

Серійні (типові) інформаційно-вимірвальні системи випускаються виробником як закінчені укомплектовані вироби, для установки яких на місці експлуатації достатньо точно вказівок, наведених в експлуатаційній документації, в якій нормовані метрологічні характеристики вимірвальних каналів.

Одиночні ІВС проектується для конкретних об'єктів (групи типових об'єктів) і приймаються як закінчені вироби безпосередньо на об'єкті експлуатації. Установку таких систем на місці експлуатації здійснюють відповідно до проектною документації та експлуатаційної документації. Перераховані види інформаційно-вимірвальних систем можуть бути використані як автономно, так і в складі більш складних структур, наприклад, ІВС, системи контролю, діагностування, розпізнавання об'єктів, випробувального обладнання, а також автоматичних систем управління технологічними процесами.

Під вимірвальним каналом розуміється конструктивно або функціонально виділена частина інформаційно-вимірвальної системи, що виконує закінчену функцію від сприйняття вимірюваної величини до отримання результатів її вимірювань, що виражається числом або відповідним йому кодом. Взаємодія ІВС з об'єктом ілюструється на рис. 1. Вимірвальні канали введення ВК-1 призначені для отримання інформації про стан об'єкта, вимірвальні канали виве-

дення ВК-2 призначені для формування впливу на об'єкт, а ЕОМ для обробки результатів вимірювань, реєстрації та індикації результатів вимірювання і обробки їх результатів. Вимірювальні канали складаються з компонентів, під якими розуміють технічні пристрої, що входять до складу інформаційно-вимірювальної системи і виконують одну з функцій, передбачених процесом вимірювань.

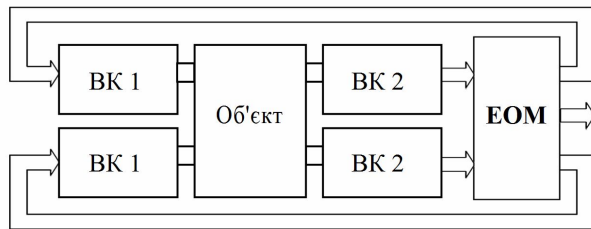


Рис. 1. Взаємодія ІВС з об'єктом

Класифікацію вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальних систем, що відображає кількісне співвідношення за конструктивно-функціональними ознаками наведено на рис. 2.

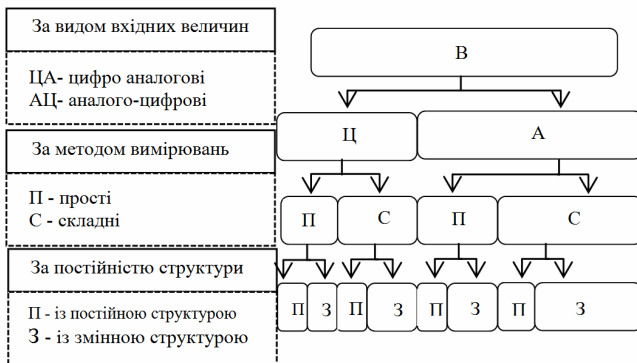


Рис. 2. Класифікація вимірювальних каналів

Розглянемо один з каналів системи контролю (рис. 3), який складається з вимірювального перетворювача (ВП) і пристрою допускового контролю та реєстрації результатів (УДКіР):

$$y = \begin{cases} y_1, & \text{при } \tilde{x} < X_{min}; \\ \tilde{x}, & \text{при } X_{min} < \tilde{x} < X_{max}; \\ y_2, & \text{при } \tilde{x} > X_{max}, \end{cases}$$

де  $X_{min}$  та  $X_{max}$  – мінімальне і максимальне значення діапазону вимірювання, при якому результат  $\tilde{x}$  вимірювання знаходиться в межах установлених границь;  $y_1, y_2$  – значення за межами результатів контролю, при яких результат вимірювань  $\tilde{x}$  знаходиться за межами установлених границь  $X_{min}$  та  $X_{max}$ .

Також розглянемо частину інформаційно-вимірювальної системи, що реалізує вимірювання кількості теплової енергії методом змінного перепаду тиску. По-перше, канали прямих вимірювань температури, тиску  $T_0$ , різниці тисків  $P$ , часу  $t$ .

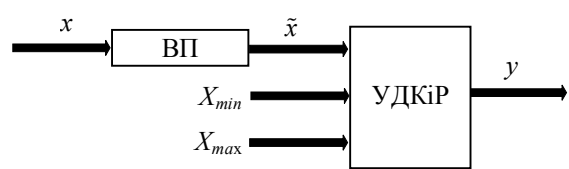


Рис. 3. Структурна схема каналу системи контролю

По-друге, канали прямих вимірювань діаметрів вимірювальної ділянки трубопроводу і звуженого устрою. По-третє, канали непрямих вимірювань діаметром  $D_{20}$  вимірювальної ділянки трубопроводу і діаметра  $d_{20}$  звужувального пристрою, приведені до значення температури  $T = 20$  С. При цьому непрямі вимірювання здійснюються з використанням температурних коефіцієнтів  $\gamma_T$  та  $\gamma_{\text{су}}$  лінійного розширення вимірювальної ділянки трубопроводу і звужено устрою, значення яких одноразово оцінюються виходячи з компонентного складу матеріалу вимірювальної ділянки трубопроводу.

При непрямих вимірюваннях опору, що реалізуються за допомогою складного вимірювального каналу, один і той же результат вимірювань може бути отриманий при різних поєднаннях напруги і струму.

Припустимо, що вимірювальний канал напруги має діапазон вимірювань від 1 до 10 В, а вимірювальний канал струму від 1 до 10 мА. З використанням зазначених вимірювальних каналів один і той же результат вимірювань опору 1 кОм може бути отриманий при різних результатах вимірювань напруги і струму: 1 В і 1 мА, 10 В і 10 мА і ін.

При знаходженні меж допустимої похибки будемо виходити з того, що межі допустимої похибки складного вимірювального каналу при отриманні результату вимірювання опору будуть різними для різних результатів прямих вимірювань, які виконуються за допомогою простих вимірювальних каналів. Так, при отриманні результату вимірювань напруги 10 В межі допустимої відносної похибки вимірювань напруги складають всього лише  $\pm C_U$ , в

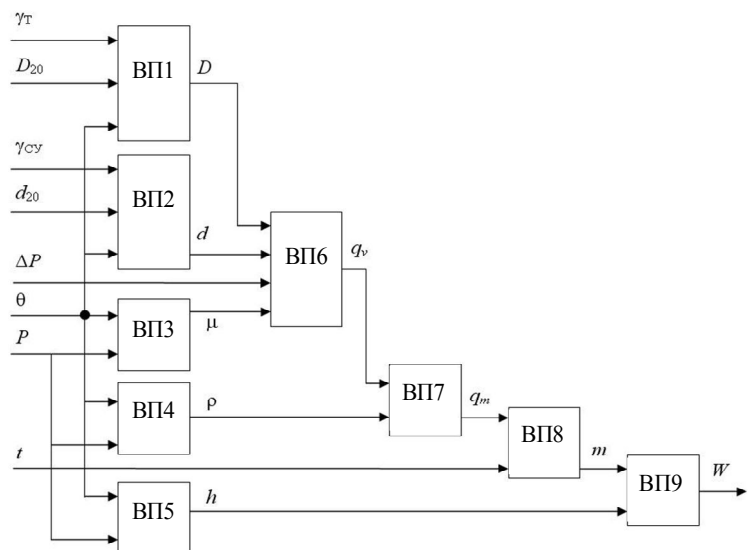


Рис. 4. Структурна схема частини інформаційно-вимірювальної системи, яка реалізує вимірювання кількості теплової енергії

той час як при отриманні результату вимірювання напруги 1В вже дорівнює  $\pm (C_U + 9 d_U)$ .

Теж саме можна сказати про границі допустимої відносної похибки. Відповідно, при отриманні одного і того ж результату вимірювання опору 1 кОм межі допустимої відносної похибки складного вимірювального каналу будуть різними для різних результатів прямих вимірювань, мінімальні для 10 В і 10 мА і максимальні для 1В і 1мА.

Методи розрахунку метрологічних характеристик вимірювальних каналів можуть бути використані як з проектною оцінкою на стадії створення, так і на етапі введення інформаційно-вимірювальної системи в експлуатацію. Необхідність застосування розрахункових методів визначення похибки вимірювальних каналів обумовлена особливостями ІВС, що не дозволяють застосувати до них традиційні методи перевірки відповідності метрологічних характеристик встановленим нормам. При розрахунках оперують з числовими значеннями величин і їх похибками, які в більшості випадків є наближеними. У вихідних даних для розрахунку вже містяться похибки, які можуть збільшуватися за рахунок процедур обчислень (алгоритму обчислень), таких як округлення, апроксимація, лінеаризація, статистична обробка даних внаслідок обмеженої кількості вихідних даних. Для розрахунку метрологічних характеристик компонентів можуть застосовуватися:

- нормовані значення метрологічних характеристик, що наведені в документації;
- значення метрологічних характеристик, що отримані в результаті експерименту.

Для розрахунку метрологічних характеристик простих вимірювальних каналів з номінальною лінійною функцією перетворення у даний час існує дві рекомендації МП22 і МП2168. Для визначення метрологічних характеристик простих вимірювальних каналів з номінальною нелінійною функцією перетворення, а також метрологічні характеристики складних вимірювальних каналів подібні загальні рекомендації відсутні. Розглянемо один з простих вимірювальних каналів, що складається з трьох перетворювачів: первинний вимірювальний перетворювач (ПВП), вторинний вимірювальний перетворювач (ВВП) і обчислювальний компонент (ОК) (рис. 5). При цьому ВВП і ОК зазвичай являють собою один з каналів вимірювально-обчислювального комплексу (ВОК).

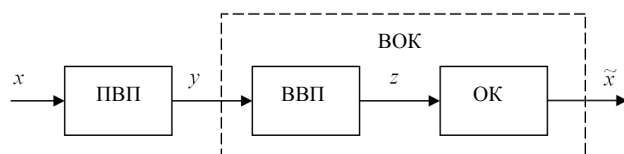


Рис. 5. Структурна схема простого ВК

При цьому в обчислювальному компоненті реалізується перетворення коду струму в код тиску з відображенням результату вимірів тиску на моніторі. Слід пам'ятати, що на випадок визначення метрологічних характеристик вимірювального каналу, до складу якого входять вимірювальні перетворювачі з

номінальною нелінійною функцією перетворення, МП22 [39] і МП2168 [40] не поширюються. Типовим представником вимірювального каналу такого типу є, наприклад, вимірювальні канали температури, до складу яких входять два компоненти, що володіють номінальною нелінійною функцією перетворення: термопар.

Склад і характеристики інформаційно-вимірювальних систем управління об'єктів в повній мірі визначаються компонентами ІВС і регламентуються як в експлуатаційній документації, так і в описі типу. Регламентація повинна відображати відповідність сукупності компонентів системи і умов їх експлуатації, діапазону вимірювань і нормованих метрологічних характеристик, а, отже, і методів перевірки відповідності метрологічних характеристик встановленим нормам. Як і решта засобів вимірювальної техніки ІВС підлягають перевірці. З огляду на те, що результатом перевірки є підтвердження придатності засобів вимірювання до застосування, то перевірка полягає не тільки в передачі розміру одиниці величини, яка повинна здійснюватися в нормальних умовах для кожного компонента інформаційно-вимірювальної системи, але і в різних перевірках (зовнішнього огляду, умов експлуатації компонентів, працездатності, характеристик безпеки та ін.), які цілком можуть бути виконані в робочих умовах. В результаті розрахунки завжди подають одні і ті ж результати. Саме тому повторення таких розрахунків при проведенні періодичної перевірки робити недоцільно. Досить виконати розрахунки один раз при проведенні випробування з метою затвердження типу (або первинній перевірці, що проводиться після заміни компонентів) інформаційно-вимірювальної системи.

## Висновки

1. В статті проведений аналіз методів організації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем управління об'єктами.

2. Спираючись на вимоги діючих нормативних документів можна надати рекомендації щодо практичної реалізації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем управління об'єктами. По-перше, подання ІВС до перевірки викликає тимчасові перерви в роботі, що може бути неприпустимим. Тому, однією з обов'язкових вимог до таких систем є наявність резервних систем, що дозволяє не тільки проводити метрологічне обслуговування (ремонт, градування, перевірку) без зупинки системи в цілому, але і приведе до підвищення її надійності. По-друге, періодичну перевірку необхідно проводити за місцем її розміщення, а засоби перевірки (еталони і допоміжне обладнання) повинні бути доставлені до місця розміщення інформаційно-вимірювальної системи. Для цього необхідно забезпечити виїзні метрологічні групи пересувних лабораторій вимірювальної техніки нового покоління.

3. Перелічені заходи дозволять підтримувати інформаційно-вимірювальні системи, канали зв'язку, системи управління об'єктів в надійному стані, що в кінцевому випадку спрямовано на виконання поставлених завдань.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кононов В.Б., Бурцева В.В. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості Системи обробки інформації: зб. наук. пр. ХНУПС. – Вип.1 (147). – Харків, 2017. – С. 88–92.
2. Кононов В.Б. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення //Авиационно-космическая техника и технология. – Харків: НАУ ХАИ—2011.-№ 8 (85) -С.231–234.
3. Кононов В.Б., Науменко А.М., Водолажко О.В., Коваль О.В., Кондрашова І.І. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. - Харків: ХНУПС, 2017. – С. 288.
4. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
5. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
6. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
7. Кононов В.Б. Застосування електричних вимірювань засобами вимірювальної техніки в умовах проведення АТО: навч. посіб./ В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Коваль та ін.. – Х.:ХНУПС, 2018. – 392 с.
8. 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.
9. Instrumentation and general principles of sensors. Part 1 / В.Б. Кононов, А.М. Науменко та ін. – Х.:ХНУПС, 2018. – 64 с.
10. Організація метрологічного забезпечення військ (сил). Ч. 1 : навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, П. М. Яблонський. – К. : НУОУ, 2009. – 356 с.
11. Організація застосування пересувних засобів метрологічного обслуговування: навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, О. В. Ярошенко. – К.: НУОУ, 2009. – 356 с.
12. Кузнецов І. Б., Марценківський В. Т., Ярошенко О. В., Буяло О. В., Проценко В. О. Удосконалення парку пересувних лабораторій вимірювальної техніки як фактор підвищення оперативності та ефективності метрологічного обслуговування складних систем // Збірник наукових праць КНУ. Вип. 32. – К. : ВКНУ, 2011. – С. 33–46.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. І. Кондрашов,  
 Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків  
 Received (Надійшла) 10.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

### Анализ методов организации метрологического обеспечения информационно-измерительных систем управления объектов

А. М. Науменко, О. О. Бабич, Е. О. Короткий

**Предметом** изучения статьи являются информационно-измерительные системы управления объектами, которые применяются при измерении физических величин в процессе эксплуатации измерительной техники. Целью статьи является анализ методов организации метрологического обеспечения информационно-измерительных систем управления объектами а так же предоставление рекомендаций касательно практической реализации метрологического обеспечения информационно-измерительных систем. **Задача, которая рассматривается**, - обоснование технических решений, внедрение которых в практику измерения помогут повысить метрологическую надёжность образцов информационно-измерительных систем. В статье рассматриваются основные термины и определения информационно-измерительных систем, их классификация и особенности метрологического обеспечения, предложения касательно упрощения методики расчета метрологических характеристик простых измерительных каналов с номинальной нелинейной функцией преобразования, регламентация состава измерительных каналов и оформление результатов поверки данных систем. **Выводы:** предложенные мероприятия разрешат поддерживать измерительные системы, каналы связи, системы управления объектов в надежном состоянии, что в конечном итоге приведёт к успешному исполнению поставленных задач.

**Ключевые слова:** система, метрологическая надёжность, измерительный канал.

### The analysis of methods of organization of metrological support of information-measuring control systems of the troops during

E. Korotkiy, A. Naumenko, O. Babich

**The subject of the study** in the article is the information-measuring control systems of troops used in the measurement of various physical quantities in the process of exploitation of military measuring equipment use and the armament. **The purpose** of the article is to analyze the methods of organizing the metrological support of information-measuring control systems of troops and to provide recommendations on the practical implementation of the metrological support of information-measuring systems. **The solving problem** is the substantiation of technical solutions, the introduction of which in the practice of measurement will increase the metrological reliability of samples of information-measuring control systems. The article deals with the main terms and definitions of information measuring systems, their classification and peculiarities of metrological service, proposals for simplifying the methodology for calculating the determination of metrological characteristics of simple measuring channels with the nominal nonlinear transformation function, the regulation of the composition of measuring channels and the design of the verification of these systems. **Conclusions:** the proposed measures (events) will allow to maintain the measuring systems, communication channels, and control systems in a reliable condition, which will ultimately lead to the successful execution.

**Keywords:** system, metrological reliability, measuring channel.

Р. В. Бреус

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

## СИНТЕЗ ДВОХРОЗЯДНИХ ДВОХОПЕРАНДНИХ ОПЕРАЦІЙ СТРОГОГО СТІЙКОГО КРИПТОГРАФІЧНОГО КОДУВАННЯ ШЛЯХОМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДРУГОГО ОПЕРАНДА

На основі дослідження різних форм представлення двохранядних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування розроблено підхід до їх побудови на основі перетворення другого операнда шляхом застосування однооперандних операцій. Застосувавши технологію перетворення другого операнда було отримано групу двохранядних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування. У даній статті приведено одержану групу двохранядних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного перетворення. Запропонований підхід до синтезу двохранядних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування шляхом перетворення другого операнда значно спрощує процес дослідження групи операцій строгого стійкого криптоперетворення.

**Ключові слова:** двохранядні двохоперандні операції, криптографічне перетворення, математичне моделювання, синтез операцій, класифікація операцій криптоперетворення.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У сучасному суспільстві технічний прогрес відіграє важливу роль, що, в свою чергу, призводить до збільшення комп'ютерних злочинів. Комп'ютерні системи і телекомунікації визначають надійність і потужність систем оборони і безпеки країни. Тому гостро постає питання захисту інформації.

Криптографічний захист інформації являється одним із найефективніших на сьогодні. Тому виникає необхідність вдосконалення існуючих та створення нових методів та засобів криптографічного захисту інформації, у зв'язку зі зростанням кіберзлочинів. Для досягнення даного результату необхідне покращення вже розроблених або створення нових алгоритмів криптоперетворення. Отже, дослідження та побудова нових операцій криптоперетворення на сьогоднішній день являється особливо актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом велика увага приділяється одному з напрямів розвитку комп'ютерної криптографії, а саме – криптографічному кодуванню [1–3]. Також заслуговують уваги дослідження направлені на побудову операцій з заданими властивостями [4–6].

Особливої уваги заслуговують дослідження направлені на побудову операцій криптоперетворення які забезпечують максимальну невизначеність результатів шифрування [7–12].

Проте на сьогоднішній день залишилися не дослідженими процеси синтезу груп двохранядних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування.

**Метою роботи** є викладення результатів дослідження і синтезу двохранядних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування для побудови їх модифікацій на основі перетворення другого операнда.

### Основний матеріал

Розглянемо одну з двохранядних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування, наприклад,

$$O_1 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Відповідно до [13] (1) можна представити як:

$$O_1 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, & \text{якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } k_1 = 1; k_2 = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Аналіз виразу (2) показує, що зміна порядку однооперандних перетворень в правій частині виразу приведе до зміни самої операції, наприклад,

$$O_1^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, & \text{якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } k_1 = 1; k_2 = 1; \end{cases} \neq$$

$$\neq \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 1; \end{array} \right\} = \quad (3)$$

$$= O_2^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus k_2 \\ k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}.$$

Приклад (3) показує коректність нашого припущення.

$$F_1(O_1^k) = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 1; \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 1; \end{array} \right\} = O_1^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Класифікація однооперандних двохранрядних операцій криптографічного перетворення інформації

Класифікатор операцій	Операції інверсії			
	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Базові операції	$F_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_3 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_4 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$F_5 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_6 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_7 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$F_8 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$F_9 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$F_{10} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{11} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$F_{12} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
Операції перестановок	$F_{13} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{14} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{15} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{16} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$F_{17} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$F_{18} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{19} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$F_{20} = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}$
	$F_{21} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{22} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$	$F_{23} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$F_{24} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}$

Аналогічно виконаємо перетворення над другим операндом двохранрядної операції строгого криптографічного кодування  $O_1^k$  за допомогою однооперандної операції криптографічного перетворення  $F_2$ . Це перетворення призводить до отримання операції строгого стійкого кодування  $O_5^k$ , що показано в прикладі (5). Якщо над другим операндом двохранрядної двохранрядної операції строгого стійкого криптографічного кодування  $O_1^k$  виконати перетворення шляхом використання однооперандної криптографічної операції  $F_9$ , то буде отримана операція строгого стійкого кодування  $O_9^k$ , що відпові-

дає прикладу (6). Одним із самих простих способів перетворення другого операнду є виконання над ним однооперандної операції криптоперетворення.

Групу однооперандних операцій криптоперетворення, класифікованих на базові операції, операції перестановок та операції інверсії наведена наведено в табл. 1 [14].

Візьмемо двохранрядну двохранрядну операцію строгого стійкого криптографічного кодування  $O_1^k$  та виконаємо над нею однооперандне криптографічне перетворення  $F_1$ .

Внаслідок даного перетворення ми отримуємо операцію строгого стійкого кодування  $O_1^k$ , що показано в наступному прикладі:

дає прикладу (6). Зведені результати дослідження результатів перетворення другого операнду операції  $O_1^k$  за допомогою однооперандних операцій криптоперетворення  $F$ , наведених в табл. 1, представлені в табл. 2.

В табл. 2 представлені отримані двохранрядні двохранрядні операції строгого стійкого криптографічного кодування класифіковано на базові операції, операції перестановок та операції інверсії. Аналіз таблиці показав, що на основі перетворення другого операнду двохранрядної операції строгого стійкого криптографічного кодування за допомогою повної математичної групи однооперандних операцій буде

отримано повну математичну групу двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування, придатних для практичного застосування. На-

ведені результати дозволяють значно спростити процес дослідження і синтезу груп операцій строгого стійкого криптографічного кодування:

$$F_3(O_1^k) = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 1; \end{array} \right\} = \\ = O_5^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (k_1 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (k_1 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (k_1 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (k_1 \oplus k_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$F_9(O_1^k) = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 0; k_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{ якщо } k_1 = 1; k_2 = 1; \end{array} \right\} = \\ = O_9^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus k_2 \\ k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Таблиця 2 – Група двохоперандних операцій строгого криптографічного кодування після перетворення

		Операції інверсії			
		$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Базисні операції	$F_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_1^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_2^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_3^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \\ x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_4^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \\ x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$
	$F_2 = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_5^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (\bar{k}_1 \oplus \bar{k}_2) \oplus x_2 \cdot (k_1 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (k_1 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{k}_1 \oplus \bar{k}_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_6^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (\bar{k}_1 \oplus \bar{k}_2) \oplus x_2 \cdot (k_1 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (k_1 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{k}_1 \oplus \bar{k}_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_7^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (k_2 \oplus \bar{k}_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{k}_2 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (\bar{k}_2 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (k_2 \oplus \bar{k}_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_8^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (k_2 \oplus \bar{k}_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{k}_2 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (\bar{k}_2 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (k_2 \oplus \bar{k}_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$
	$F_3 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_9^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \oplus k_1 \\ k_2 \oplus k_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{10}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_1 \oplus x_2 \cdot k_1 \\ x_1 \cdot k_1 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \oplus k_1 \\ k_2 \oplus k_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{11}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \\ x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus k_2 \\ k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_{12}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \\ x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus k_2 \\ k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$
Операції перестановки	$F_{13} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{13}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{14}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{15}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \\ x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{16}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \\ x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$
	$F_{17} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_{17}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus k_2 \\ k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_{18}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus k_2 \\ k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_{19}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \\ x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{20}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot k_2 \oplus x_2 \cdot \bar{k}_2 \\ x_1 \cdot \bar{k}_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus k_2 \\ k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}$
	$F_{19} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{21}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (\bar{k}_1 \oplus \bar{k}_2) \oplus x_2 \cdot (k_1 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (k_1 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{k}_1 \oplus \bar{k}_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_{22}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (\bar{k}_1 \oplus \bar{k}_2) \oplus x_2 \cdot (k_1 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (k_1 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{k}_1 \oplus \bar{k}_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_2 \\ \bar{k}_2 \end{bmatrix}$	$\alpha_{23}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (k_2 \oplus \bar{k}_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{k}_2 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (\bar{k}_2 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (k_2 \oplus \bar{k}_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$	$\alpha_{24}^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot (k_2 \oplus \bar{k}_2) \oplus x_2 \cdot (\bar{k}_2 \oplus k_2) \\ x_1 \cdot (\bar{k}_2 \oplus k_2) \oplus x_2 \cdot (k_2 \oplus \bar{k}_2) \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ \bar{k}_1 \end{bmatrix}$

**Висновки**

В результаті дослідження розроблено підхід до побудови двозрядних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування на основі перетворення другого операнда. Застосування групи

однооперандних операцій для перетворення другого операнда дозволяє отримати групу двохоперандних операцій строгого стійкого криптоперетворення. Розроблений підхід дозволяє значно спростити процес дослідження та синтезу групи операцій строгого стійкого криптоперетворення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Криптографическое кодирование: методы и средства реализации: монография / Рудницкий В.Н., Пивнева С.В., Бабенко В.Г., Миронец И.В. и др. // Тольятт. гос. ун-т. – Тольятти, 2013. – 196 с.
2. Криптографическое кодирование: методы и средства реализации (часть 2): монография / В.Н. Рудницкий, В.Я. Мильчевич, В.Г. Бабенко, Р.П. Мельник, С.В. Рудницкий, О. Г. Мельник. – Х. : едрая усадьба плюс, 2014. – 224 с.
3. Криптографічне кодування: обробка та захист інформації: колективна монографія / під ред. В.М. Рудницького. – Харків: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. – 139 с.
4. Рудницкий В. М., Бабенко В. Г., Рудницкий С. В. Метод синтеза матричных моделей операций криптографического кодирования та декодирования информации. Сборник научных работ Харьковского университета Повітряних Сил. Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. Вип. 4 (33). С. 198-200.
5. Мельник Р. П., Застосування операцій розширеного матричного криптографічного перетворення для захисту інформації / Р. П. Мельник // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 9. – С. 145-147.
6. Синтез элементарных функций перестановок, керованих інформацією / В. М. Рудницкий, Т. В. Миронюк, О. Г. Мельник, В. П. Щербина // Безпека інформації. – Т. 20, № 3. – К.: НАУ, 2014. – С. 242–247.
7. Рудницкий В.М. Метод синтеза операций криптографического перетворення за критерієм строгого стійкого кодування / В.М. Рудницкий, Л.А. Шувалова, О.Б. Нестеренко // “Вісник ЧДТУ”. - Черкаси, 2017 – Вип. 1 – С.5-10.
8. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
9. Рудницкий, Н. Лада, С. Козловська, Технологія побудови двооперандних операцій криптографічного перетворення інформації за результатами моделювання, Сучасні інформаційні системи, Т. 2, № 4, С. 26-30, 2018.
10. Рудницкий В.М., Лада Н.В., Федотова-Півень І.М., Пустовіт М.О. Синтез обернених двохрозрядних двооперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування. Системи та методи обробки інформації. Збірник наукових праць. Київ: ДНДІ МВС України, 2018. Вип. 4(55). С. 76–81.
11. Mozhaev O. Multiservice network security metric / O. Mozhaev, H. Kuchuk, N. Kuchuk, M. Mozhaev, M. Lohvynenco // IEEE Advanced information and communication technologies-2017. Proc. of the 2th Int. Conf. – Lviv, 2017. – P. 133-136.
12. Semenov, S., Sira, O., Kuchuk, N. (2018), “Development of graphicanalytical models for the software security testing algorithm”, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol 2, No 4 (92), pp. 39-46, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127210>
13. Рудницкий В.М., Лада Н.В., Федотова-Півень І.М., Пустовіт М.О., Нестеренко О.Б. Побудова двохрозрядних двооперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2018. Т. 6(52). С. 113–115.
14. Рудницкий В.М., Лада Н.В., Федотова-Півень І.М., Пустовіт М.О., Нестеренко О.Б. Побудова двохрозрядних двооперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2018. Т. 6(52). С. 113–115.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
 Національний технічний університет «ХПІ», Харків  
 Received (Надійшла) 12.08.2019  
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.09.2019

### Синтез двухразрядных двооперандных операций строгого стойкого криптографического кодирования путем преобразования второго операнда

Р. В. Бреус

На основании исследования различных форм представления двухразрядных двооперандных операций строгого стойкого криптографического кодирования разработан подход к их построению путем преобразования второго операнда с помощью применения однооперандных операций. Применив технологию преобразования второго операнда, была получена группа двухразрядных двооперандных операций строгого устойчивого криптографического кодирования. В этой статье приведена полученная группа двухразрядных двооперандных операций строгого устойчивого криптографического преобразования. Предложенный подход к синтезу двухразрядных двооперандных операций строгого устойчивого криптографического кодирования путем преобразования второго операнда значительно упрощает процесс исследования группы операций строгого устойчивого криптопреобразования.

**Ключевые слова:** двухразрядные двооперандные операции, криптографическое преобразование, математическое моделирование, синтез операций, классификация операций криптопреобразования.

### Synthesising the two-bit two-operand operations of strict stable cryptographic coding by the second operand's conversion

R. Breus

Based on studying the different representation forms of two-bit two-operand operations of strict stable cryptographic coding, it was developed an approach to their construction based on the second operand transformation by the one-operand operations use. A group of two-bit two-operand operations of strictly stable cryptographic coding was obtained by using the second-operand conversion technology. The obtained group of two-bit two-operand operations of strict stable cryptographic transformation is presented in the article. The proposed approach for synthesizing the two-bit two-operand operations of strict stable cryptographic coding by the second operand transformation simplifies the research process of strict stable cryptographic conversion group of operations greatly.

**Keywords:** two-bit two-operand operations, cryptographic transformation, mathematical modeling, synthesis of operations, classification of cryptopreformation operations.



A. Hafiak, O. Shefer, A. Klochko, I. Harlamov

Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

## PROFESSIONAL COMPETENCE OF FUTURE SPECIALISTS IN INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES: QR CODING IN STUDENT LEARNING

The article explores modern information and telecommunication technologies, which are the basis of information processes in education. The fundamentals of improving the quality of student training from the point of view of the development of a vocational education system are investigated. The authors explore the definition of an innovative educational environment. It is proved that professional IT education is the basis for improving its quality level and has certain advantages over other types of knowledge, providing flexibility due to modern technological features, including the use of QR coding information.

**Keywords:** pedagogical innovations, information technologies, software tools, QR coding, innovative teaching methods, applied software.

### Introduction

Modern society challenges the university to prepare an active and responsible graduate who can subsequently be competent in all its fields: science, education, economics, politics, etc.

This becomes possible only if the student wants to gain new knowledge, to make any there were new discoveries for himself, to know the world. On the way to this, it is impossible to do without the means of new, more interesting for students, teaching methods, modern educational technologies.

If you make a portrait of a modern student, you can see that more and more life of modern applicants is occupied by new technologies. He brings a telephone, laptop or tablet to the school. Thus, we can say that the student is progressive and has access to any information from world sources through his gadgets [1-3].

Today, the IT sphere is very well developed, but not always new technologies can interact with the university, because they imply a high level of teacher training, as well as considerable financial investments. However, many universities currently use digital laboratories, projectors, interactive whiteboards, and much more.

A very common conclusion is that phones in the classroom interfere and distract the student from his educational activities. But as already mentioned, in the modern world it will be hard to do without mobile and computer devices. That is why it is necessary to combine, engage students in educational cognitive activities using their smartphones.

Recently, a QR code has been actively used in the process of preparing students. The abbreviation QR (quick response) in translation from English means "fast response". This is a two-dimensional bar code (matrix code), which was developed by the Japanese company "Denso Wave" in 1994.

It allows you to place 2953 bytes of information in one small square, that is, 7089 digits or 4296 letters (about 1-2 pages of text in A4 format), 1817 characters [3-5].

A QR code allows you to quickly encode and read (decode): texts, URLs of various sites, active links for

downloading information, advertising, etc. Using QR code, information is much larger than that of a conventional bar code, and for decoding, personal devices of students with an installed code reading program can be used, which greatly facilitates work in an audience where there are not enough computers (Fig. 1).

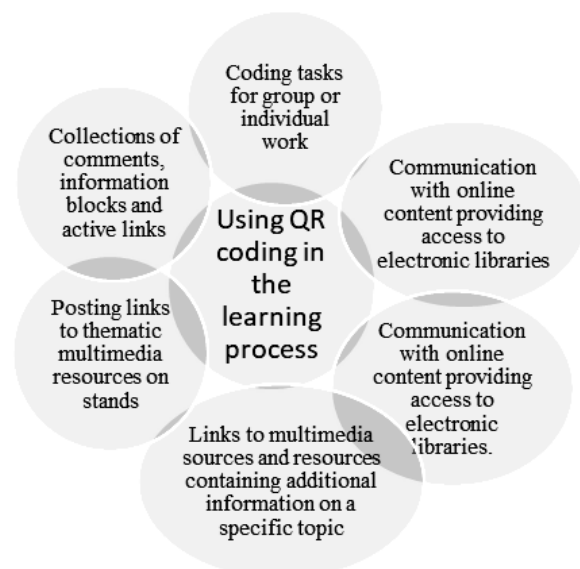


Fig. 1. QR coding in the learning process

### Main part

To create a QR code, you need a generator that is available online, which is easy to use and does not require any special knowledge. To do this, there are many free resources in the public domain (Fig. 2).

The most popular code reading and decoding programs for mobile phones are:

1. I-nigma - already mentioned this program, which exists for different mobile platforms.
2. Barcodes Scanner is a popular application that exists in variations for Android and Ios.
3. QuickMark - suitable for almost any mobile device.
4. BeeTagg - another universal program for scanning and recognizing a QR code, suitable for a huge number of mobile phone models.

5. UpCode - again a multi-platform scanner and decoder.

6. Neo Reader - well, you get the idea.

7. Decrypt the QR code yourself - an article on Habr on how to do without reading programs.

Online services to help decrypt any code:

1. ZXing Decoder Online. It works simply: you are prompted to specify the URL of the image with a QR code that is located on the Internet or download it from your computer. After you click the "Submit" button, a page with decryption results will open.

2. Qr.foxtools.ru. Choose the decryption option and get two options for downloading pictures from bar-code.

3. BarCapture. The desktop is a program that has the same features (Fig. 3).

QR technologies can initiate students' project activities. The group is divided into mini-groups of 4-5 people, and each group receives its own QR code with reference to certain information. Each group scans QR codes and reads the received text, highlighting the main idea of the text, the essence and necessity of the study, the reasons for the success of the innovation and its future prospects.

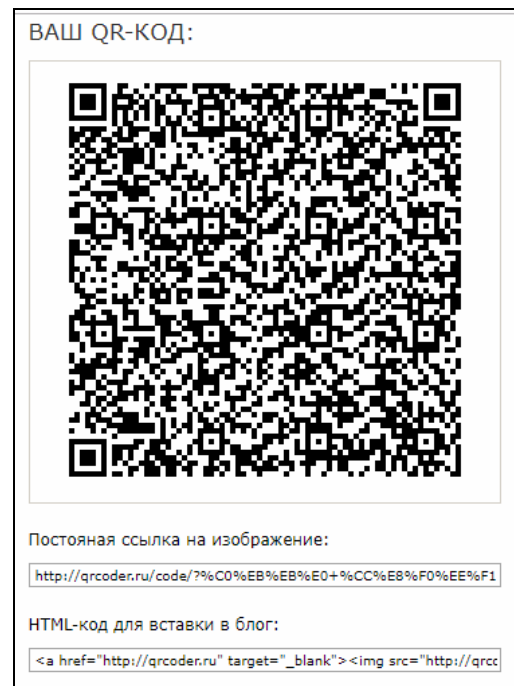


Fig. 2. Generated QR code of the article title.

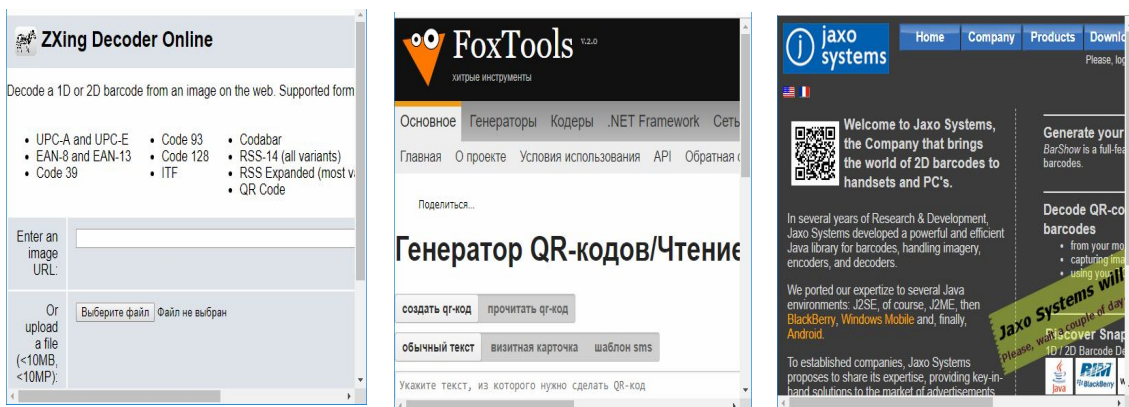


Fig. 3. Online QR code decryption services

Each group also needs to argue its position on this issue. Then there is a change of groups: in a new group, 1 or 2 students from each previous group are combined, that is, in a newly formed group, each student owns information only in its own text. During the discussion, each presents information on his own text, answering the questions that arise, then the information is analyzed and an oral or written statement is written on a given topic.

The next interesting methodological technique that stimulates the internal motivation of students and generates cognitive skills is the use of a QR code to create educational posters.

So, for example, it's easier to generate a QR code to create a task of this kind:

Topic: «Formation of professional competence of future specialists in information and communication technologies». Task: prepare a Professional Case (according to the topic of the variant according to the sample), which should include:

1) introduction (identification, selection and problem solving);

2) general knowledge or information (taking into account the principle of cross-curriculum);

3) description of the problem (situation, history);

4) conclusions (formulation of questions, tasks, etc., forecasting awareness on the issues);

5) package of information materials (video, audio materials, materials on electronic media links to Internet resources, etc.): advertising video (video, presentation)

6) conclusions.

The figure shows the generated QR code of this job (Fig. 4).

For example, earlier in the design of course projects, stamps were widely used, the contents of which were: the name of the discipline, the topic of the project, the author of the project, page number.

Now this information can be encoded using QR code. This will save time, paper and complicate the process of copying information without the permission of its author. It is also possible to use a QR code to encrypt the results of examinations, course projects, and even graduate qualification works of bachelors and masters.



Fig. 4. Generated QR code of the task

So, for example, it can also be used in self-testing, when the answers are encrypted in QR codes that are added to documents and handouts or presented on the blackboard before the lesson, as well as in additional tasks that allow some students to complete tasks of increased complexity

### Conclusions

The use of this technology has a very wide range of applications, which is why it arose relatively recently. Nowadays, when the use of other people's developments, both scientific, methodical, and any other nature is becoming more common, it is necessary to apply additional measures to combat plagiarism and other negative consequences, especially during the rapid development of information and telecommunication technologies. The relevance of this research topic is undeniable. Developments in this field of application of information technologies are constantly appearing in the field of student education and improve the quality of professional education at universities.

### REFERENCES

1. Hafiak A. Information technology as a component of improving the training quality future specialists in higher education institutions / Hafiak A., Yastreba S., Nosach O., Borodina E. I // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019 – Вип. 2(54). – С. 60–65. – doi: 10.26906/SUNZ.2019.2.060
2. About the Concept of the National Program of Informatization: Law of Ukraine from 04.02.1998 № 75/98-BP // Verkhovna Rada of Ukraine. – 1998, № 27–28, Art. 182
3. E. Borodina Areas of application programming languages python and ruby / Borodina E.A., Alyoshin S.P., Hafiak A.M., Smislov S.O., Sapsay E.V. // Modern engineering and innovative technologies. Issue 7. Part 3. Sergeieva&Co LuBstr. 13 76227 Karlsruhe, Germany – P. 74- 77. DOI: 10.30890/2567-5273.2019-07-03-050
4. A. Hafiak A. Application of genetic programming tools as a means of solving optimization problems/ A. Hafiak, E. Borodina, A. Diachenko-Bohun // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2018 – Вип. 6(52). – С. 58–60. – doi: 10.26906/SUNZ.2018.6.058
5. S.P. Alyoshin Developing q-orca site backend using various python programming language libraries. / Alyoshin S.P., Borodina E.A., Hafiak A.M., Zhabran I.B., Kikot A.S. // Modern engineering and innovative technologies. Issue 7. Part 3. Sergeieva&Co LuBstr. 13 76227 Karlsruhe, Germany – P. 48- 53. DOI: 10.30890/2567-5273.2019-07-03-021

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. Л. І. Леві,  
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава  
Received (Надійшла) 30.08.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.09.2019

### Профессиональная компетентность будущих специалистов по информационно-коммуникационным технологиям: использование QR-кодирования в процессе обучения студентов

А. М. Гафияк, А. В. Шефер, А. Клочко, И. Харламов

В статье исследуются современные информационные и телекоммуникационные технологии, которые являются основой информационных процессов в образовании. Исследованы основы повышения качества подготовки студентов с точки зрения развития системы профессионального образования. Авторы исследуют определение инновационной образовательной среды. Обосновано, что профессиональное ИТ образование является основой повышения уровня его качества и имеет определенные преимущества по сравнению с другими видами знаний, обеспечивая гибкость за счет современных технологических особенностей, в том числе использование QR-кодирования информации.

**Ключевые слова:** педагогические инновации, информационные технологии, программные средства, QR-кодирование, инновационные методы обучения, прикладное программное обеспечение.

### Професійна компетентність майбутніх фахівців з інформаційно-комунікаційних технологій: використання QR-кодування в процесі навчання студентів

А. М. Гафіяк, О. В. Шефер, А. Клочко, І. Харламов

У статті досліджуються сучасні інформаційні і телекомунікаційні технології, які є основою інформаційних процесів в освіті. Досліджено основи підвищення якості підготовки студентів з точки зору розвитку системи професійної освіти. Автори досліджують визначення інноваційного освітнього середовища. Обґрунтовано, що професійне ІТ освіта є основою підвищення рівня його якості і має певні переваги в порівнянні з іншими видами знань, забезпечуючи гнучкість за рахунок сучасних технологічних особливостей, зокрема використання QR-кодування інформації.

**Ключові слова:** педагогічні інновації, інформаційні технології, програмні засоби, QR-кодування, інноваційні методи навчання, прикладне програмне забезпечення.

G. Golovko, K. Nikiforova

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava

## INFORMATION SEARCH SYSTEMS USAGE IN POLTAVA NATIONAL TECHNICAL YURI KONDRATYUK UNIVERSITY CHEMISTRY DEPARTMENT INFORMATION SYSTEM

The article describes the features of the use of modern information systems in the activities of the department of higher education institutions. The essence of information systems and the tasks they can perform are revealed. The features of relational and social interaction are described. The basic components of the parts that form the internal information base are determined. The directions of the introduction of information and communication technologies in the management and educational activity of an educational institution are considered. The dependence of the information system effectiveness on the correct strategy for the development, acquisition and use of software products is determined. The article describes the ways of developing and developing information management systems in a higher educational institution. It is proved that the information systems use is a prerequisite for the activity of a modern higher education institution, which will promote the adoption of sound strategic management decisions aimed at increasing competitiveness and creating an adequate and efficient infrastructure.

**Keywords:** systems, information systems, information technologies, automation, management, information search systems.

### Introduction

Various types of resources are needed for the development of human society: instrumental, material, energy, as well as information.

At present, there is a significant increase in the volume of information flows and this applies to almost all spheres of human activity.

The environment in which a person lives, studies and works has a significant influence on the formation of the individual.

Therefore, the urgent problem for all higher educational institutions it is necessary to introduce modern innovative technologies to create a modern informational educational and scientific environment. The university has information systems in which the student can at any time receive all necessary information for training, tutorial instruction and communication with colleagues.

The university information systems correspond to the modern needs of the information society, the current state of science and technology development, educational standards and promote the formation of information and communication competencies of all participants in the educational process from the professor to the student [2].

### The research purpose

Analysis of the peculiarities of the modern information systems use in the activity of the higher educational institution in order to create an effective infrastructure and its compliance with the strategic objectives of the higher educational institution. Identify the essence of information systems and the tasks they can perform. To study the main components that form the internal information base. Investigation of the importance of implementing information and communication technologies in the management. Determine the dependence of the effectiveness of the information system on the correct strategy for the development, acquisition and use of software products.

### Literature Review

In scientific literature there are many definitions of the "information system" notion. However, as the research shows, there is no single established and generally accepted definition.

Depending on the need, in different cases, different thoughts are applied. Thus, in the economic encyclopedia E. Panchenko notes that the basis of information systems are information models that describe and regulate information flows in management with the help of certain algorithms and procedures for the recording and processing information.

According to V. Ponomarenko, the purpose of the information system is the production of information for the use by the management apparatus. Accordingly, it provides for the accumulation, editing, preservation, processing, generalization and specification of information.

I. Vovchak argues, if the definition of the term "information system" is to be based on a resource approach, the information system can be interpreted as a combination of means and methods of production, accumulation, transformation and use of information resources of the enterprise in order to realize the basic functions of management by users [6].

The Czech researcher K. Kachir considers the difference in the data processing system from information systems, emphasizing the destination and purpose of their design. At the same time, he notes that the data processing system is designed to perform this function over the data that arose at the enterprise and are recorded in certain information media. In other words, this system is not conditioned by the ultimate goal of management - making the necessary management decisions [1].

### Research results

Information system is a set of organizational and technical means for storing and processing information in order to provide information needs of users.

Information systems exist from the moment of the society appearance, because at each stage of its development there is a need for management

The mission of the information system is the processing of information necessary for the effective management of all organization resources, the creation of information and technical environment for managing its activities.

An information system can exist without the use of computer technology, it is a matter of economic feasibility.

In any information management system, the three types of tasks are solved:

- problems of situation assessment (sometimes referred to as problems of pattern recognition);
- tasks of transforming the description of the situation (calculation tasks, modeling tasks);
- tasks of decision-making (including optimization).

Information systems include: technical means of data processing, software and relevant personnel. Four components form an internal information base:

- means of fixing and collecting information;
- means of transferring relevant data and reports;
- means of information preservation;
- means of information analysis, processing and presentation.

For a modern higher education institution (HEI) information is one of the most important components of management processes, because its production, transmission and consumption is a "foundation" for the effective functioning of all spheres of society's life.

The result of any modern social institution activity, first of all - the education system, largely depends on the formation correctness and use of information flows [5].

Information system of a higher educational institution is a set of interconnected components that:

- collect,
- process,
- store,
- distribute and analyze information that provides decision-making,
- coordination,
- monitoring and implementation of the organization's activities.

Information refers to data that are presented in a particular form and have meaning and benefit for those who use it.

The effectiveness of the information system depends on the correct strategy of the development, acquisition and use of software products.

Qualitative higher education should be focused on innovative technologies and products offered by companies - world leaders in the field of information technology.

The use of home-made software products that require the constant technical support of developers and become morally obsolete even before their normal work can be get its act together [1].

A new qualitative stage in the development of education is possible only with the intensive introduction of information and communication technologies in the management and educational activities of a comprehensive educational institution. Such activity is conducted in two directions:

- implementation of information technologies in the management of educational activities;
- computerization of the institution educational process and educational work.

The first of these directions is in creating optimal conditions for automating work places of the participants in the educational process and their use of software, which will help to systematize the management work of educational institutions at all levels of the management system.

The second direction is the testing and introduction into the educational process of electronic learning materials, the development and application of electronic support of training sessions, self-sustaining and educational work and test software tools [6–11].

The use of an integrated information system and modern information technologies in the educational process and in the management system as a whole can be considered from different points of view. On the one hand, it is the basis of the university's innovative management system, on the other hand, it is a means of creating conditions for the development of student's creative abilities, increasing the teacher's competence, individualizing the learning process, and ensuring the learning process quality.

Innovation in the educational institution management based on information technology is a key mechanism that will create an advantage in a competitive environment. In this direction, the main measures in the development of informatization is the creation of its proper and efficient infrastructure, the introduction of unified means of access to corporate data, the management improvement of all complexes of information resources, and also ensuring the compliance of the infrastructure with the higher educational institution strategic objectives [4].

In the structure of information systems of higher educational institutions one can identify a number of subsystems - both autonomous and integrated into the general automated control system of universities.

There are the following subsystems:

- subsystems such as "electronic dean's office";
- the subsystem of the educational process supervisory control, including the functions of developing the schedules of training sessions;
- subsystem of methodological support management and a base of educational materials, which is intended to accompany educational and methodical documentation and electronic educational materials;
- subsystem of the research sector management;
- subsystem of paperwork, supporting the work of the office, archives, expeditions, etc .;
- subsystem "Cadre";
- accounting and planning-economic subsystems;

- library information system, which serves for accounting of library funds, search for users of literary sources, registration and satisfaction of quotes;
- remote control subsystem included in the educational portals software;
- subsystem of university engineering services support.

Typically, there are two ways of developing information management systems at universities: the creation of a single corporate automated control system or the creation and integration of independent programs that automate the activities of individual units or some management functions [3].

In the process of developing the informatization project for educational process management at the university it is necessary to take into account such features:

- a large number of workplaces, where computer equipment is periodically changed and operating systems are updated;
- considerable distance of users of the system located in different parts of the city;
- information is created in the system by a small number of "active" operators;
- information is used by a wide range of consumers (management staff, dean's and department staff, teachers and students, their parents) with different access rights;
- the need for a permanent adaptation of the information system to the educational process needs, which change as a result of the higher education system transformation.

An information system is a system designed to store, retrieve, and process information, and relevant organizational resources that provide and disseminate information.

There are two important components to finding information on the Internet - completeness and accuracy. Typically, this is all called a single word - relevance, that is, the relevance of the response to the request [12].

Relevance is a measure of the search engine's relevance to the search query.

The primary method for evaluating relevance is the TF-IDF method, which is used in most search engines (both Internet search engines and reference systems (MSDNs)).

Its content is that the greater the local frequency of a term (query) in document (TF) and the greater the "rarity" (ie, the less common it is in other documents) of the term in the collection (IDF), the higher the weight of the document relative to the term - that is, the document will appear earlier in the search results for that term [3].

Associative search is based on two key principles: all data is stored in computer memory (RAM); the calculations are performed in real time.

These architectural solutions are underpinned by two important trends in computer development. The first is the transition from 32- to 64-bit computing,

which has led to an exponential increase in the size of computer RAM.

The second is the ubiquity of multi-core processors.

Currently, servers that have 8 processors and a total of 48 cores are widely used. The changes have dramatically increased the computing power of parallel-computing applications [5].

There is a task to create an information system for the chemistry department of the Yuri Kondratyuk National Technical University with a system of information search.

This information system should contain information about the history of the department and its staff composition.

Also it has to provide information to students and entrants about the teaching and research work of the department, methodological support and participation in conferences.

### Conclusion

One of the challenges faced by a modern university is to increase its efficiency, namely, a comprehensive action on the strategy, network infrastructure, organizational structure, management and payment systems, and the corporate culture of a higher educational institution.

The construction, support and development of a single integrated university management information system is an extremely complex and time-consuming process that must be consistent with the concept of activity and strategy of the institution's development. The main features of relevant and associative search are described in the article.

The only solution to this problem is to automate the university activities and create an informational environment, which, on the one hand, provides access to the necessary, consistent and complete information when is essential for users, on the other hand, is an essential tool for the university staff activities and the training of students.

Such an information environment allows you to manage processes, data and people, that is, the information environment can be considered from the point of view of maintaining of the university life and as a management tool.

At the moment, most of the universities use "partial" automation, that is, they computerize only certain business processes.

It leads to duplication and loss of information, lack of data for operational analysis, loss of time for maintenance and maintenance of obsolete technologies, high degree of dependence on the human factor.

Thus, the experience of designing and practical application of the automated control system at a higher educational institution has shown that the innovative technologies implementation in the field of its informatization contributes to the optimization of the educational process and is an effective tool for providing high-quality training of specialists.

## REFERENCE

1. Beynon-Davis, Paul. Information Systems Development. London, Macmillan Education Ltd., 1989. pp. 38-54.
2. Tozer, Edwin E. Planning for Effective Business Information Systems. Oxford: Pergamon Press, 1988. 265 p.
3. Project Management for Information Systems in Higher Education, presentation to the HERUG International Conference, Newcastle, 10-12 April 2001
4. Lindsay, J. (2006). Information systems – Fundamentals and issues. Kingston University, UK
5. Lovrekovic, Z., Ruzic-Dimitrijevic, L., & 5. Nikolic, B. (2007). Information system implementation based on process approach at higher education institutions. Proceedings of the Computer Science and IT Education Conference, CSITEd 2007, Mauritius.
6. Golovko G. V. Information systems use at Poltava national technical Yuri Kondratyuk University / G. V. Golovko, K. M. Nikiforova // Control, navigation and communication systems. - 2018. - vol. 3. - pp. 103-105. - URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz\\_2018\\_3\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_3_22).
7. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 117–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>.
8. Шматков С. І. Модель інформаційної структури гіперконвергентної системи підтримки електронних обчислювальних ресурсів університетської e-learning / С. І. Шматков, Н. Г. Кучук, В. В. Донець // Системи управління, навігації та зв'язку : науковий журнал. – Полтава : ПНТУ, 2018. – Вип. 2 (48). – С. 97-100.
9. 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>.
10. 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>
11. Merlac V. Resources Distribution Method of University e-learning on the Hyperconvergent platform / V. Merlac, S. Smatkov, N. Kuchuk, A. Nechausov // Conf. Proc. of 2018 IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018. Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2018. – P. 136-140. – URL : <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114>
12. Hammerstrøm K, Wade A, Jørgensen AMK. Searching for studies: a guide to information retrieval for Campbell Systematic Reviews Campbell Systematic Reviews 2010.

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. О. В. Шефер,

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава

Received (Надійшла) 15.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

**Використання систем пошуку інформації в інформаційній системі кафедри хімії  
Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка**

Г. В. Головко, К. М. Нікіфорова

В статті описано особливості використання сучасних інформаційних систем у діяльності кафедри закладу вищої освіти. Виявлено сутність інформаційних систем та задачі, які вони можуть виконувати. Описано особливості реляційного та асоціативного пошуку інформації. Визначено основні складові частини, які утворюють внутрішню інформаційну основу. Розглянуто напрямки запровадження інформаційно-комунікаційних технологій в управлінську та навчально-виховну діяльність навчального закладу. Визначено залежність ефективності інформаційної системи від правильної стратегії розроблення, придбання і використання програмних продуктів. У статті описано способи розробки та розвитку інформаційних систем управління у вищому навчальному закладі. Доведено, що використання інформаційних систем є обов'язковою умовою діяльності сучасного вищого навчального закладу, що сприятиме прийняттю обґрунтованих стратегічних управлінських рішень, спрямованих на зростання конкурентоспроможності та створення належної та ефективної інфраструктури.

**Ключові слова:** системи, інформаційні системи, інформаційні технології, автоматизація, управління, системи пошуку інформації.

**Использование систем поиска информации в информационной системе кафедры химии  
Полтавского национального технического университета им. Юрия Кондратюка**

Г. В. Головко, К. Н. Никифорова

В статье описаны особенности использования современных информационных систем в деятельности кафедры учреждения высшего образования. Выявлена сущность информационных систем и задачи, которые они могут выполнять. Описаны особенности реляционного и ассоциативного поиска информации, определены основные составные части, которые образуют внутреннюю информационную основу. Рассмотрены направления внедрения информационно-коммуникационных технологий в управленческую и учебно-воспитательную деятельность учебного заведения. В статье описаны способы разработки и развития информационных систем управления в высшем учебном заведении. Определена зависимость эффективности информационной системы от правильной стратегии разработки, приобретения и использования программных продуктов. Доказано, что использование информационных систем является обязательным условием деятельности современного высшего учебного заведения, будет способствовать принятию обоснованных управленческих решений, направленных на рост конкурентоспособности и создания надлежащей и эффективной инфраструктуры.

**Ключевые слова:** системы, информационные системы, информационные технологии, автоматизация, управление, системы поиска информации.

A. Goroshko, T. Derkach, T. Dmitrenko, A. Dmitrenko

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

## ASSESSMENT OF SOCIO-ECONOMIC VALUE AND EFFICIENCY OF AUTHOR'S SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM

The main goal of the article is to study and analyze the functional software and hardware complex application areas, as well as to assess the socio-economic significance and effectiveness of the developed software and hardware complex. **Summary.** As a study result, the following conclusions were obtained: 1. The implementation effectiveness of a particular invention, project or rationalization proposal is based on taking into account the results and costs incurred to achieve them and the economic feasibility of the proposed solution to the problem. 2. Cost estimation model - COCOMO II and similar models are suitable for automatically calculating the software product cost with a large number of code lines. 3. FSA is the most effective way to determine the economic software and hardware systems feasibility, where you need to take into account the author's device material component itself. 4. The developed author's software and hardware complex will have an economic effect from the introduction in the first year of its use both for the manufacturer or consumer, and for the state as a whole.

**Keywords:** software and hardware complex, intellectual potential, intellectual capital, functional-cost analysis (PSA).

### Introduction

Nowadays in Ukraine, IT professionals are relevant to carry out appropriate calculations to assess the economic importance and effectiveness of software product development necessary to promote innovation on the market. At the present stage, intangible and innovative-intellectual components, which include software products, the quality of server services, and the like, occupy an increasing share in the structure of the value of goods.

The development of information technologies, their deep penetration into the production process, a decisive increase in the role and importance of the human mind, science, information and knowledge in the economy and society development as a whole, contributed to the intellectual capital emergence. At the present stage, most world countries determine the priorities of their nation intellectual capital development. Recently, it is the nation's intellectual capital that is increasingly becoming a leading factor in economic growth and international exchange, radical structural changes, and has become the main factor in determining the market value of high-tech companies and the formation of a competitiveness high level. Based on this, it can be argued that a qualitatively new type of economy is emerging in the modern world - an economy based on knowledge and the artificial intelligence use.

It is well known that leading countries ensure their development through knowledge-based innovation-oriented industries. The formation of Ukraine as an independent and economically independent state is based on the formation of a new world economic development model - the knowledge economy [1]. The knowledge economy concept has recently become an important theoretical, methodological and scientific-practical basis for the economic growth of many countries. It reveals the new human intelligence role and place in society. In connection with the technological development accelerated pace, the knowledge availability is becoming an essential condition for a country's participation in global competition. The

current social and economic development state of society requires the intellectual capital preparation as one of the innovative development priorities.

For the needs of the country's innovative development, education plays an extremely important role and is the key to the accumulation of intellectual capital. It is not only a connecting, but also a constructive link in the system of the main components of an innovative economy - "science-education-production". In combination, the educational potential acts both as a source of replenishment of highly qualified personnel and as the main factor in mastering the population of modern knowledge.

The mastery level of modern knowledge directly affects the educational potential, which in turn leads to an increase in the state intellectual potential. Preserving the student health during the educational process is great importance for the our state future. Recently, the increased young people fatigue during the educational process leads to an increase in the treatment cost, first aid, risk of accidents, etc. [2,3]. Therefore, a hardware-software complex for determining human fatigue was created, which provides high accuracy and flexibility of a diagnostic operation to determine the person functional state. It is characterized by convenience and simplicity in its use and has the ability to remotely change the frequency-pulse and color-light characteristic, which consists of a simple electronic component base.

However, it is well known that the any invention effectiveness, project or software development is based on taking into account the results and costs incurred to achieve them and the economic feasibility of the proposed solution to the problem.

### Analysis of recent research and publications

The intensive research beginning of models for estimating the software products cost dates back to the 60s of the last century, when E.A. Nelson, an employee of System Develop-C ment Corporation (SDC), published his first paper [5]. After the book publication - in the late 60s - early 70s - a fairly large assessment models number appeared (Delphi, Wolverton, etc.).



The Delphi model was created by Rand Corporation back in 1940, but the research results were published only in the seventies. TRW employee model R.U. Volverton, who later became, together with a group of other researchers, the creator one of the most widely used cost estimation models - COCOMO, which was released in 1974 [6].

The first commercial product for evaluating the software project cost appeared in 1977, it was the PRICE-S model developed by the staff of Martin Marietta Price Systems F. Freimen and Dr. R. Park [7]. A little later, in 1978, a second commercial model appeared - SLIM, created by Quantitative Software Management, Inc. (QSM).

By the end of the 70s - beginning of the 80s, a number of serious models appeared - such as SEER, ESTIMACS. In 1981, Dr. Barry Bohem, a researcher, director of the Center for System and Software at the University of Southern California, proposed his COCOMO model (The CONstructive COSt MODEL - a constructive cost model), which was based on the counting lines code metric [8]. It has become one of the most popular due to its accuracy and calibration capabilities for various projects. In 1995, an updated model version was published [9]. In the eighties, large organizations such as the Rome Air Development Center (RADC) and NASA joined in the cost estimation problem study.

### Purpose of the article

The main goal of the study is to analyze the socio-economic assessment significance and effectiveness of the developed author's hardware and software complex [10–13].

### The main part of the article

At the present society development stage, in the rapid development era of information technology, the number of high-budget projects in the software development field is constantly growing, and therefore it becomes very important to be able to assess the project benefits and losses at various development stages, to analyze possible scenarios of the events development. According to statistics, about a quarter of all started projects are completed in a timely manner, a quarter is canceled and about half of all projects are completed in budget expenditures excess or delayed. Most of the reasons are related to the project incorrectness cost estimates, which makes this direction one of the most important. The selected model and software should be tested on real projects in order to identify discrepancies between the values obtained on the model basis and software and the actual values for the project. Based on the results obtained, it can be concluded that it is advisable to use selected models and software as a cost estimation model. In case of discrepancies, it is necessary to find a way to eliminate them, to determine the model improving possibility, improving the estimates accuracy.

To assess the invention effectiveness of the indirect evaluation hardware-software complex methods are used. It is clear that reducing fatigue will increase the

assimilation rate of educational material, improve the training and maintain health quality of young people, which in turn will reduce the treatment cost and etc. The one person training cost in a comprehensive school for the state is 3000 hryvnias. This value is obtained taking into account the health costs protection and disease prevention and it is 10-15%, that is, 300-450 hryvnia. If the proposed inventions will reduce the incidence of eyes, scoliosis or other organs by 5%, then the annual savings per person will be 15 UAH. If you take it on a countrywide basis, you can easily calculate the total savings by producing a certain amount by the total number of students, that is, 4,299 thousand. People will give 64.5 million UAH. saving.

The next step to solve the problem was to calculate the hardware-software complex costs for measuring the functional state. In order to improve the quality and consumer software and hardware complex properties at all stages of the life cycle, a functional cost analysis (FSA) was applied. Functional-cost analysis is an effective method for determining the cost and other products and services characteristics, which is based on the functions resources involved use and in the production, marketing, sale, delivery, technical support, services, customer service, and quality assurance. This method was first used by General Motors (USA) in 1947. The method is widely used in the USA, England, Japan and other countries. The method of an innovative object comprehensive technical and economic study in order to develop and improve its useful functions with the optimal ratio between their importance for the consumer and the implementation cost is perfectly developed and described in the literature. So, the main purpose of the FSA is to help reduce the production cost, work and services while improving or maintaining the achieved quality of work performed at all stages. Mathematically, the FSA method can be represented by the formula:

$$\frac{CB}{B} \Rightarrow \max \quad (1)$$

where SB is the use value of the software package, which is a consumer properties combination (total cost); B - the cost of achieving the necessary consumer properties. The software product in question is a product, that is, a use value, not for the manufacturer, but for the consumer. The consumer software product value can be estimated using both quantitative indicators and relative scores, which are used for a qualitative and complex description (assessment of the aesthetic and visual qualities of software solutions).

In our study, we lay the foundation of the FSA on such principles as a functional approach, that is, object study consideration taking into account the functions for which it is created; valuation, is a continuous economic evaluation of emerging software solutions; systematic approach to the FSA software solution; full achievements of computer science and heuristics, etc.

FSA methodological principles are presented in Fig. 1. The tasks and features described above should be carried out during the life cycle of the software product, for management and health purposes it can be divided into stages.

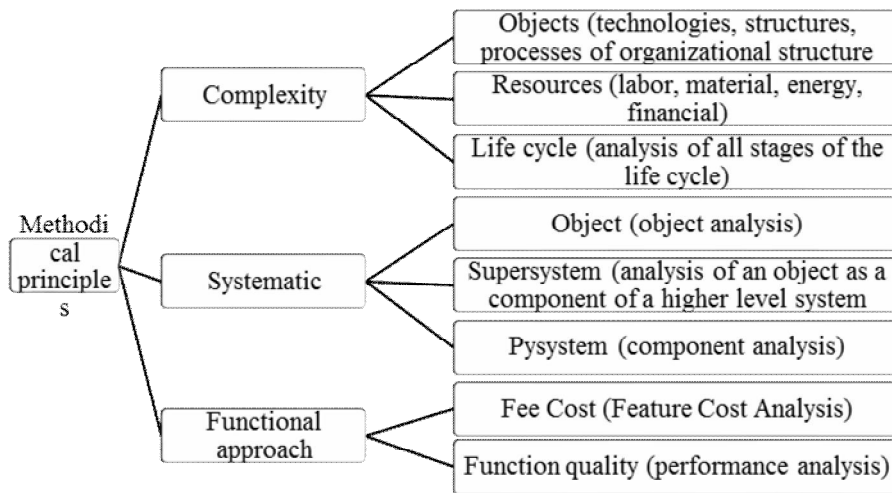


Fig. 1. FSA methodological principles

The actions and stages sequence of the life cycle of the developed hardware-software complex is shown in Fig. 2.

Functional and cost software product analysis consists of a set of interrelated activities aimed at creating conditions for the organization of work for its preparation and conduct.

For a detailed analysis of consumer properties of a software product, its technical functions, as well as the functions of its individual parts related to their manufacture, it is necessary to attract various specialists. It is impossible to conduct a comprehensive analysis by the forces of one or a small group of specialists, for this we need appropriate specialists: developers, designers, economists, marketers, innovation managers, etc.

The conducting process a software product functional-cost analysis consists of the following stages: preparatory; informational; research; analytical; recommendatory; innovative.

At the first, preparatory stage, it is necessary to determine the analysis object and develop organizational forms for conducting the FSA. At the analytical stage, information is collected and systematized on the object functional structure and on the material carriers of its individual functions. As a study result, it was at the analytical stage that the technical, economic, operational, ergonomic and aesthetic object functions as whole and additional technical functions were examined in detail. As you know, in an analytical study, an object is considered as a set of functions that it performs. Among these functions, some are basic, since they stem from the purpose of the object, the second are auxiliary, because they create conditions for the implementation of the basic functions, and the third functions are superfluous, that is, they are not needed at all. The proportion of individual functions in the total set of consumer object properties is determined by the importance coefficient or significance. When determining this coefficient, the most important characteristics for the consumer are taken into account (table 1).

The table computes and shows the cost coefficients for each individual function.

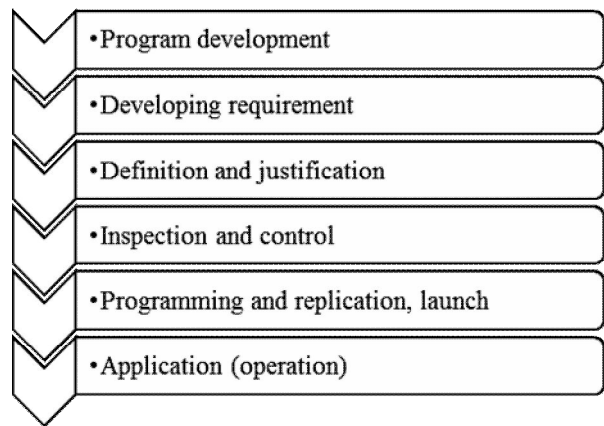


Fig. 2. The actions and stages sequence of the life cycle of the developed hardware-software complex

In general terms, this coefficient is equal to the ratio of the function specific gravity in expenses in the function significance. An important parameter in the table is the first one for which:

$$K_{\phi_1} = \frac{70}{50} = 1,4 > 1. \tag{2}$$

This coefficient indicates a mismatch between the costs and function significance, usually it should be equal to 1. If the cost coefficient is less than 1, the ratio is considered favorable, and if the value is more than 1, it is recommended to reduce costs.

The search for the most rational solutions was carried out from the implementation perspective of the studied functions and ensuring the requirements for the object performance. The solution options feasibility study is carried out according to the documents in force in the economic efficiency field. Using the proposed methods, the developed hardware-software complex was tested by both the author and the Ministry of Economic Development [10, 11].

The main criterion for the rational decisions selection was the maximum beneficial effect value per unit of total costs for the manufacture and operation of the object, increasing its competitiveness and increasing profits from its implementation.

Table 1 – Comparison of significance coefficients and the functions parameters expenses share

Functions	Significance, %	The function share in costs, %	Function Cost Ratio
Performance Indicators Ecrera	50	70	1,4
Power consumption	25	10	0,4
Ergonomics	15	10	0,67
Information content	10	10	1
Total	100	100	-

The functional model was built using several levels. Each functions level has its purpose.

At the upper (first) level, the study object external functions are located, they are performed by the object as a whole. At the second level - the main functions. The third and fourth levels are designed to accommodate the study object auxiliary functions.

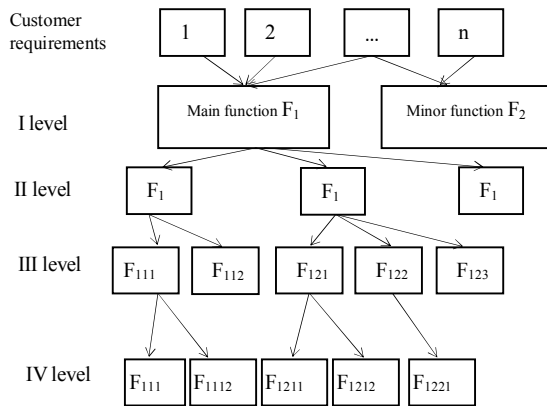


Fig. 3. Functional Model Diagram

When evaluating the functions values having a vertex at a higher functional model level, the main condition is the equality:

$$\sum_{i=1}^n a_j = 1, \quad (3)$$

where is  $a_j$  – a value  $j$ -i functions;  $i = 1...n$  – the number of given level functions having a common vertex.

Along with the function name, the value  $a_j$  is placed on the functional model. The functional model has a multi-stage structure, where the function value of any level ( $R_{Fij}$ ) as a whole is proposed to be determined by the following formula:

$$R_{Fij} = \prod_{I=1}^G a_{F_{ij}} \quad \text{при } 0 < a_{F_{ij}} < 1, \quad (4)$$

Where is  $a_{Fij}$  – a value  $i$ -i functions  $j$  – th level;  $G$  – the number of functional model levels.

In the upper right corner, the numbers indicate the function value in relation to the higher level function value. The determination of the software solution functions values in a functional model is presented in Fig. 4.

In accordance with the functional model, first of all, were calculated values of the main and functions, based on their providing role the object needs.

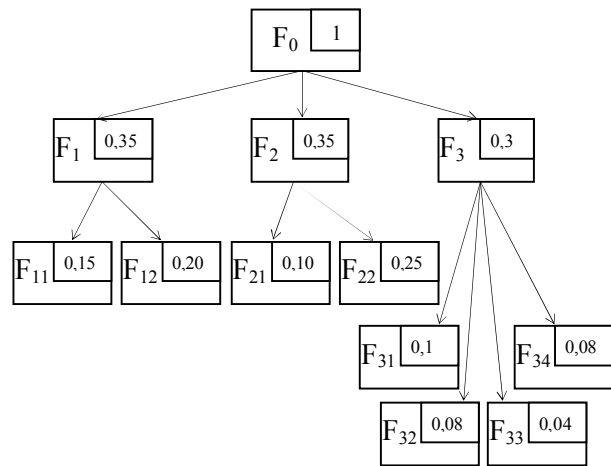


Fig. 4. Determining the software solution functions values in a functional model

Secondly, the functions values, based on the implementation role of the main and auxiliary functions. The sum of the main functions ( $F_1, F_2, F_3$ ) is equal to one and equal to the value of the main function ( $F_0$ ). The sum of the auxiliary functions values ( $F_{11}, F_{12}$ ) is equal to the function value ( $F_1$ ). So, the function  $F_1 = 0.35$ , and its components  $F_{11} = 0.15$  and  $F_{12} = 0.20$ .

Thus, we have:  $F_{11} + F_{12} = F_1; 0,15 + 0,20 = 0,35$ .

Similarly, we get the value  $F_2$ , namely:

$$F_{21} + F_{22} = F_2; 0,10 + 0,25 = 0,35.$$

Accordingly, if  $F_{31} = 0,1; F_{32} = 0,08; F_{33} = 0,04;$

$F_{34} = 0,08$ , and  $F_3 = 0,3$ , thus we have an expression:  $F_{31} + F_{32} + F_{33} + F_{34} = F_3; 0,1 + 0,08 + 0,04 + 0,08 = 0,3$ .

As noted above, the value of the main function is unity ( $F_0=1$ ), so:

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_0; 0,35 + 0,35 + 0,3 = 1.$$

The procedure for determining actual costs includes: the material carriers proportion in the function implementation; the costs share determination of creating each material carrier that falls on this function; summing the function costs for all tangible media.

In order to determine the share of each material carrier in the identified functions implementation by comparing the functional and structural models, a functional - structural model (FSM) was built. To build it, a graphic form was used. For each function, a detailed analysis was carried out to identify its usefulness.

The carried out cost calculation made it possible to determine the approximate annual economic effect of the development implementation, which in turn allowed us to draw conclusions about the using appropriateness the proposed version of the hardware-software complex. According to the analysis results, the estimated annual economic effect from the development implementation is 152,000 UAH. The proposed complex version will reduce the manufacturing complexity by 128600 standard hours and reduce the indirect maintaining health cost by 64500000. UAH. (The calculation is made for students of a comprehensive school).

### Conclusion

1. The implementation effectiveness of a particular invention, project or rationalization proposal is based on

taking into account the results and costs incurred to achieve them and the economic feasibility of the proposed solution to the problem.

2. Cost estimation model - COCOMO II and similar models are suitable for automatically calculating the software product cost with a large number of code lines.

3. Functional-cost analysis is the most effective

way to determine the economic software and hardware systems feasibility, where you need to take into account the material component of the author's device itself.

4. The developed software and hardware complex will be economically profitable when implemented in the first year of its use for the state, manufacturer and consumer.

#### REFERENCES

1. Postanova Verkhovnoi Rady Ukrainy vid 3 liutoho 2011 roku N 2992-VI: Pro Rekomendatsii parlamentskykh slukhan pro stanovyshche molodi v Ukraini "Molod za zdorovy sposib zhyttia"// Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. – 2011. – N 24. – S. 17.
2. Goroshko A. Problems of fatigue of modern youth / A. Goroshko // Ecology is a plus. – 2011. – №5. – p. 6-13.
3. A. Goroshko, T. Derkach, T. Dmytrenko Program development for mobile control of functional human condition on android platform / Systems of Control, Navigation and Communication. – Poltava : Poltava NTU, 2019. – № 2(54). – p. 74-76.
4. Natsionalna stratehiia rozvytku osvity v Ukraini na 2012-2021 roky / Uriad. Port. – [Electronic resource] - Access mode: <http://www.kmu.gov.ua/control/publish/articlearid7=245571411>.
5. McConnell S. How much does a software project cost / S. McConnell // M.: Peter. – 464 pp.
6. Millsup C. Oracle. Performance Optimization/ C. Millsup, D. Holt // Symbol Plus. – 2006. – 464 pp.
7. Fatrell, R. T., Shafer, D. F., & Shafer, L. I. (2003). Upravlenie programmnyimi proektami: dostizhenie optimalnogo kachestva pri minimume zatrat, (Trans. from English). Moscow: Izd. dom "Viliams". 1136 p.
8. Barry W. Boehm. Software cost estimation with COCOMO II. Prentice Hall PTR, 2000.
9. Boehm B, Clark B, Horowitz E, Westland C, Madachy R., Selby R. Software Life-cycle Processes: COCOMO 2.0. // Annals of Software Engineering Special Volume on Software Process and Product, 1995.
10. Pat. 129513 Ukraina, MPK A61B3/00. Prohramno-aparatnyi kompleks po vyznachenniu vtomliuvannosti liudyny /Horoshko A.I., Horoshko O.-I. I.; vlasnyk Horoshko A.I., U2018 06753; zaiavl. 14.06.2018; opubl. 25.10.2018, Biul.№20.
11. Pat. 129512 Ukraina, MPK A61N5/01. Sposib vyznachennia vtomliuvannosti liudyny /Horoshko A.I., Horoshko O.-I. I.; vlasnyk Horoshko A. I., U2018 06752; zaiavl. 14.06.2018; opubl. 25.10.2018, Biul.№20
12. Avt. Pravo №81100 21.08.2018 Kompiuterna prohrama "Mikroprohrama "2A+" dlia prohramno-obchysliuvalnoi platformy Arduino" /Horoshko A.I.
13. Avt. Pravo №81099 21.08.2018 Kompiuterna prohrama "Mobilnyi dodatok" Mobilnyi diagnostical complex — eye fatigue" ("Mobilnyi dodatok - "MDC-EF") / Horoshko A.I.

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. О. В. Шефер,

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

Received (Надійшла) 23.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.10.2019

#### Оцінка соціально-економічного значення та ефективності авторського програмно-апаратного комплексу

А. І. Горошко, Т. М. Деркач, Т. А. Дмитренко, А. О. Дмитренко

Основна мета статті полягає в дослідженні і аналізі функціональних областей застосування програмно-апаратного комплексу, а також в оцінці соціально-економічного значення та ефективності розробленого програмно-апаратного комплексу. Висновки: 1. Ефективність реалізації певного винаходу, проекту або раціоналізаторської пропозиції базується на обліку результатів і витрат, понесених для їх досягнення і економічної доцільності запропонованого вирішення проблеми. 2. Модель оцінки вартості - COCOMO II і подібні моделі придатні для автоматичного підрахунку вартості програмного продукту при великій кількості рядків коду. 3. ФВА - найефективніший спосіб для визначення економічної доцільності програмно-апаратних комплексів, де потрібно враховувати матеріальну складову самого авторського приладу. 4. Розроблений авторський програмно-апаратний комплекс матиме економічний ефект від впровадження вже в перший рік свого застосування для держави, виробника і споживача.

**Ключові слова:** програмно-апаратний комплекс, програмний продукт, функціонально-вартісний аналіз (ФВА).

#### Оценка социально-экономического значения и эффективности авторского программно-аппаратного комплекса

А. И. Горошко, Т. Н. Деркач, Т. А. Дмитренко, А. А. Дмитренко

Основная цель статьи заключается в исследовании и анализе функциональных областей применения программно-аппаратного комплекса, а также в оценке социально-экономического значения и эффективности разработанного программно-аппаратного комплекса. Выводы: 1. Эффективность реализации определенного изобретения, проекта или рационализаторского предложения базируется на учете результатов и расходов, понесенных для их достижения и экономической целесообразности предложенного решения проблемы. 2. Модель оценки стоимости - COCOMO II и подобные модели пригодны для автоматического подсчета стоимости программного продукта при большом количестве строк кода. 3. ФВА - самый эффективный способ для определения экономической целесообразности программно-аппаратных комплексов, где нужно учитывать материальную составляющую самого авторского прибора. 4. Разработанный авторский программно-аппаратный комплекс будет иметь экономический эффект от внедрения уже в первый год своего приложения для государства, производителя и потребителя.

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс, программный продукт, функционально-стоимостный анализ (ФВА).

О. А. Кобилін, С. О. Вискребенцева, Р. В. Петрова

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ОБРОБКА ДАНИХ, ЩО МІСТЯТЬ ПРОПУСКИ В ЗАДАЧАХ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ

**Предметом** досліджень є методи підготовки та обробки вхідних даних, що містять пропущені значення, для їх подальшого аналізу та кластеризації. **Метою дослідження** є розгляд існуючих методів позбавлення від пропусків у даних в задачах кластеризації та доцільність їх використання у реальних задачах. **Завдання:** аналіз переваг та недоліків кожного з методів, що направлені на відновлення даних, для визначення доцільності використання їх в задачах кластеризації та виділення оптимального методу, порівняльний аналіз методів, оцінка результативності за наслідками порівняння кластеризації відновлених даних з результатами кластеризації еталонних даних. **Методи:** FCM - для проведення безпосередньо кластеризації даних, метод видалення всіх рядків, що містять пропуски, заповнення пропусків вибірковими статистиками, заповнення пропусків з урахуванням структури зв'язків. **Результати:** ефективність застосування методів при підготовці даних для подальшої кластеризації залежить від кількості наявних пропусків в похідному наборі. Якщо таких рядків досить мало, то кожен, з розглянутих методів, може бути використаний і дати необхідні результати. Але, якщо рядків з пропусками досить багато, наприклад 30%, тоді найбільш прийнятними для використання можна назвати методи, що пов'язані з заміною значень, однак слід враховувати, що така заміна може призвести до спотворення даних, а з рештою і результатів. **Висновки. Наукова новизна** – дослідження проблеми кластеризації даних, що містять пропущені значення та розгляд методів, які дозволяють розв'язати цю задачу. Проведення експериментів та порівняння результатів кожного з методів, висновки про доцільність використання того чи іншого методу та побічні ефекти. **Практична значущість** роботи полягає у визначенні можливості використання в реальних задачах, що зазвичай не є ідеальними і з великою ймовірністю міститимуть пропуски, методів обробки даних для використання їх в задачах кластеризації.

**Ключові слова:** кластеризація, неповні дані, обробка та аналіз даних, Data Mining, FCM, методи відновлення даних, мова програмування R.

### Вступ

З швидким розвитком комп'ютерних технологій і наук задачі, що постають перед науковцями змінюються, так раніше обчислювальні машини, а, разом з ними і комп'ютерні науки, розвивалися досить повільно і основний інтерес становив розвиток саме апаратної бази: збільшення пам'яті, як оперативної так і жорстких дисків, загальна швидкість обчислень та інше. Розвиток програмного забезпечення був обмежений саме апаратними характеристиками, необхідно було розв'язувати проблеми збільшення працездатності програми та вирішувати задачі скорочення ресурсів, а саме зменшення програмного коду.

На сьогодні проблема з пам'яттю або обчислювальними ресурсами не стоїть так гостро, апаратна база стрімко розвивається і більше не становить основний інтерес. Ще однією рушійною силою є те, що комп'ютери стали все більш доступними і немалий вклад в розвиток технологій роблять пересічні користувачі. Враховуючи це, збільшується кількість інформації, що потрапляє в комп'ютер і безпосередньо в Інтернет.

Зі збільшенням об'ємів даних стали виникати нові задачі, все більший інтерес становить робота з даними і розв'язання проблем, що пов'язані з їх обробкою і подальшим аналізом. Оскільки можливості створення нового контенту мають всі бажаючі – обсяги даних непомірно зростають, а їх впорядкованість слабка. З'являється необхідність пошуку даних, в тому числі зображень, їх обробки, для маркетингових і статистичних досліджень, використанню у інших сферах, наприклад повсякденного життя пересічного користувача.

Найпопулярнішими напрямками досліджень частіше стають: Big Data, Data Mining, Machine Learning, постає питання пошуку даних їх глобальний та інтелектуальний аналіз. Серед таких актуальних завдань знаходять своє місце і поняття класифікації та кластеризації даних.

Класифікація встановлює закономірності для розбиття даних на заздалегідь визначені підмножини (класи).

Кластеризація є процес розбиття заданої вибірки об'єктів (спостережень) на підмножини (як правило, непересічні), які називаються кластерами, так, щоб кожен кластер складався з схожих об'єктів, а об'єкти різних кластерів істотно відрізнялися [1].

Задачі подібні, але основна відмінність полягає у тому, що кластеризація передбачає розбиття за умови початкової невизначеності щодо конкретних груп, вона може мати критерії щодо кількості кінцевих кластерів, але не їх зміст, тобто, можна сказати, що це навчання без вчителя.

Виділяють наступні основні завдання кластерного аналізу [2]:

- розробка типології або класифікації;
- дослідження корисних концептуальних схем групування об'єктів;
- породження гіпотез на основі дослідження даних;
- перевірка гіпотез для визначення, чи дійсно типи (групи) виділені тим чи іншим способом, присутні в наявних даних.

Отже, кластеризація становить інтерес, як спосіб попередньої обробки даних, для більш зручного подальшого аналізу. Отримавши необхідні групи, а також їх центроїди можна продовжувати роботу вже з конкретними представниками, а не з усім набором

даних, що особливо актуально в умовах безкінечно зростаючого об'єму інформації. Даний підхід дозволяє краще зрозуміти дані, шляхом використання для кожного кластеру найбільш оптимального алгоритму аналізу; провести стиснення, виділивши найбільш типових представників, за умов збитковості даних; виявлення новизни, шляхом виділення об'єктів, що не потрапили до жодного з кластерів.

Сфера застосування може бути доволі широка, використання в сегментації зображень [8], аналізу відео [9], прогнозування, аналіз текстів, оптимізація, машинне навчання, інтелектуальному аналізі даних [7]. Таким чином вивчення та використання методів кластеризації для вирішення багатьох важливих питань є досить цікавою задачею, але вона має низку своїх недоліків і проблем, що потребують вирішення.

Так, наприклад, однією з проблем кластеризації можна виділити роботу з пропусками даних. Існує безліч методів, але вони не передбачають відсутності якоїсь кількості інформації. Але, як тільки ми виходимо за рамки тестових даних і переходимо до обробки реальних - стикаємося з цією проблемою, адже в дійсності ідеальних даних не існує і всі вони містять шуми (некорисну інформацію, яка може зашкодити результату), пропуски, невідповідні формати та інше.

Таким чином, доцільним є розгляд варіантів рішення проблеми кластеризації даних з пропусками.

### Кластеризація та класичні методи кластеризації

Описуючи процес кластеризації, позначимо множину об'єктів, що складається з набору атрибутів  $x_i = \{t_1^i, t_2^i, \dots, t_m^i\}$ , як  $\tau = \{x_i\}_{i=1}^n$ , де  $t_v^i$  приймає значення із заданої множини  $T_v^i$ . Завдання кластеризації полягає в побудові множини  $C = \{c_v\}_{v=1}^k$  і відображення  $F: \tau \rightarrow C$  заданої множини об'єктів на множину кластерів.

Кластер містить записи з  $\tau$  подібними (за заданим критерієм) один на одного

$$x_i \in c_v, x_j \in c_v \Rightarrow d(x_i, x_j) < \varepsilon, \quad (1)$$

де  $d(x_i, x_j)$  – міра близькості між об'єктами (відстань), а  $\varepsilon$  - максимальне значення порогу, що формує один кластер [1].

Виходячи з [3], можна сказати, що методи кластеризації поділяються на ієрархічні та неієрархічні (алгоритми розподілу) алгоритми.

В процесі ієрархічної кластеризації відбувається злиття та поділ кластерів під час побудови дерева вкладених кластерів (дендрограми). Ієрархічні методи також поділяються на:

- агломеративні, на початку алгоритму кожен елемент це окремий кластер, при подальших кроках кластери поєднуються в один. Таким чином, метод полягає в об'єднанні кластерів, зменшенні їх кількості;

- дівізивні, тобто один кластер на початку і подальше його розділення на більшу кількість кластерів.

Неієрархічні методи відрізняються тим, що потребують наявності умови зупинки і кількість кластерів. Це ітеративний процес поділу на кластери до тих пір доки не буде виконана умова зупинки. Неієрархічні методи кластерного аналізу більш придатні у випадку великої кількості спостережень.

Найбільш популярним методом неієрархічної кластеризації є метод найменших квадратів

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} |x_i - s_j|^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

і його чисельна реалізація називається методом  $k$ -середніх.

Алгоритм  $k$ -середніх полягає у тому, що на початку обирається  $k$  довільних центри, далі, за цими центрами, решта множини розбивається на групи. На наступному кроці обчислюються нові центри для отриманих кластерів таким чином, щоб квадрат евклідової відстані від елемента кластера до його центроїду був меншим ніж відстань до центроїдів решти кластерів [4].

Модифікацією цього методу можна вважати *fuzzy k-means* або *c-means* [5], який відрізняється тим, що кожен елемент кластеру належить до нього з певною ймовірністю, і його не обов'язково можна чітко віднести до одного з кластерів, тобто групи можуть перетинатися.

Неієрархічні методи більш стійкі до шумів, неправильної метрики та наявності незначимих параметрів у порівнянні з ієрархічними методами, які виграють, у випадках з невизначеною кількістю кластерів, ітерацій, або умови зупинки. Також ієрархічні методи дозволяють більш детально вивчити структуру даних.

### Проблеми кластеризації, робота з пропусками

Розбиття множини на групи подібних об'єктів це потужний механізм підготовки даних до подальшого аналізу, але існує проблема обробки даних, що не є повними, тобто мають пропуски. Відсутні дані створюють багато труднощів, оскільки більшість процедур аналізу даних не були для них призначені [6]. Зважаючи на те, що в реальних даних велика ймовірність отримати таку ситуацію, коли інформація, що аналізується не повна, можна сказати, що відмовитися від кластеризації за цією причиною не вихід, тому така задача потребує вирішення і є актуальною.

Отже, існують декілька можливих рішень проблеми обробки даних з пропусками. Їх умовно можна поділити на такі, що націлені на попередню підготовку даних і ті, що вимагають адаптації (модифікації) стандартних алгоритмів кластеризації для обробки безпосередньо даних з пропусками. Кожен з цих варіантів має свої недоліки та переваги, і не є універсальним для рішення проблеми.

Розглянемо деякі варіанти попередньої обробки вхідних даних:

1. Виключення рядків з наявністю пропусків

Це метод, що легко реалізувати, але він може призвести до суттєвої втрати важливих даних. Його можна використовувати лише тоді, коли пропуски в даних розміщені випадковим чином і їх доволі мало, щоб вплинути на кінцевий результат.

2. Метод найближчих сусідів

Базується на тому, щоб знайти найближчий, за певним критерієм, рядок, схожий на рядок з пропуском. Далі, для позбавлення від пропуску, значення схожого рядка усереднюється за певним критерієм. Даний метод, у випадку великої кількості пропусків, допускає ряд похибок.

**Практичні результати застосування методів обробки даних з пропусками**

Таблиця 1 – Похідні дані для дослідження

№	Назва	Опис
1	age	Вік, в роках
2	sex	Стать (1 = чоловік; 0 = жінка)
3	cp	Тип болю в грудях
4	trestbps	Артеріальний тиск у стані спокою (в мм рт.ст. при надходженні в госпіталь)
5	fb	Рівень цукру в крові натще > 120 мг / дл (1 = істина; 0 = брехня)
6	restecg	Результати електрокардіографії в спокої
7	thalach	Досягнуто максимальний пульс
8	exang	Розвинути стенокардію, викликану фізичним навантаженням (1 = так; 0 = ні)

3. Заповнення пропусків середніми значеннями у стовпці

Відбувається заміна пропусків на їх оцінки, найчастіше це може бути середнє значення вибірки, мода, медіана і регресивні моделі, коли невідоме значення ознаки обчислюється за допомогою знай-

деної функції регресії за відомим ознаками. До недоліків слід віднести спотворення, що вносяться в розподіл даних та зменшення дисперсії.

4. Регресійний аналіз

Так само потребує випадкового розподілення пропусків і залежить від правильно обраного методу регресійного аналізу. Для початку проведемо класифікацію похідної таблиці, яка не містить пропусків у даних. Для кластеризації оберемо метод – fuzzy k-means і мову програмування R. Виконаємо побудову "нечітких" кластерів з використанням функції fanny() з пакету cluster:

```
res.fanny <- fanny(data, k = 3, memb.exp = 1.3,
metric = "euclidean", stand = TRUE, maxit = 500)
print(res.fanny$membership,3)
```

- обрано 3 кластери (k = 3);  
 - memb.exp обрано таким чином, що memb.exp -> 1 дає більш чітку кластеризацію, тоді як memb.exp -> Inf призводить до повної нечіткості;  
 - metric - рядок символів, який вказує метрику, що буде використовуватися для розрахунку відмінностей між спостереженнями. Варіанти «euclidean», «manhattan» і «SqEuclidean». Евклідові відстані - це корінь суми квадратів різниць, манхетенські відстані – сума абсолютних різниць, а «SqEuclidean», квадрат евклідових відстаней – сума квадратів різниць.  
 - stand – параметр логічного типу, якщо true, вимірювання в x стандартизуються перед обчисленням відмінностей. Вимірювання стандартизовані для кожної змінної (стовпчик) шляхом вирахування середнього значення змінної і ділення на середнє абсолютне відхилення змінної: maxit – максимальна кількість ітерацій, у нашому випадку – 500; перші, середні та останні 10 рядків, отримані за результатами кластеризації, наведено на рис. 1, а.

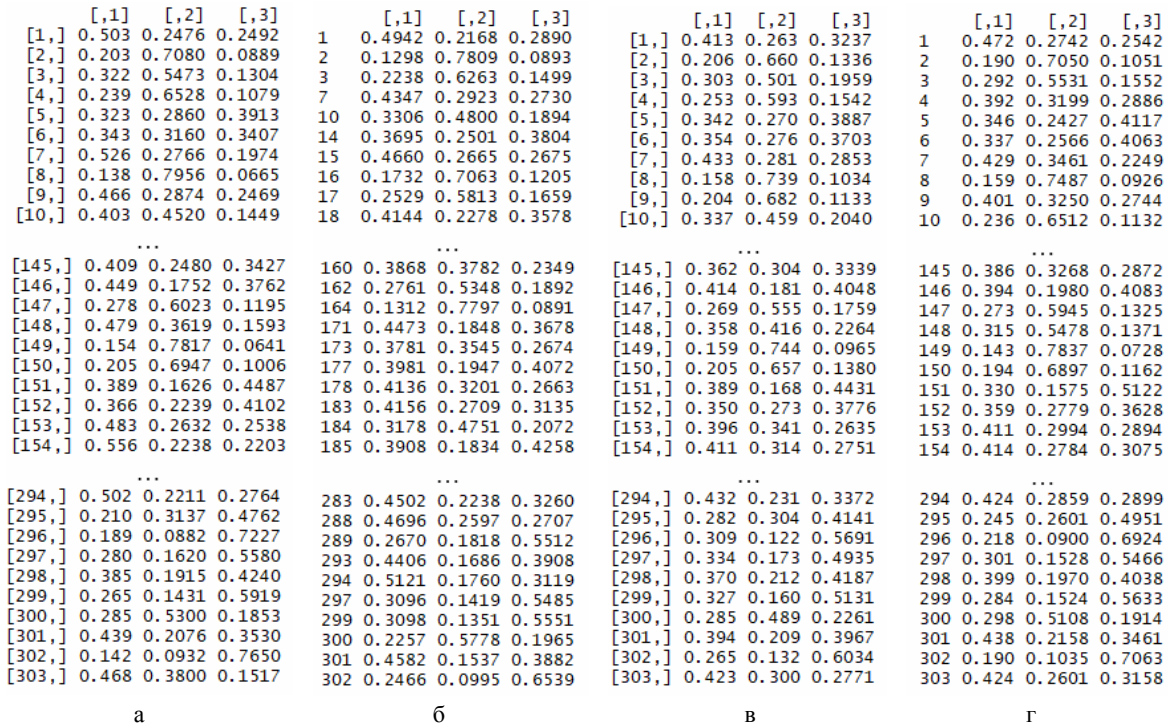


Рис. 1. Результат застосування функції fanny: а – всі дані; б – при видаленні 30% даних; в – при заміні 30% значень на медіани; г – при заміні 30% значень з урахуванням структури зв'язків

В результаті виводиться матриця коефіцієнтів приналежності, максимальний з яких визначає цільовий кластер.

Для оцінки міри нечіткості, отриманої класифікації, використовується коефіцієнт поділу Dunn:

$$F_k = \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^k \frac{\mu_{ir}^2}{k} \quad (3)$$

Даний коефіцієнт приймає значення 1 в разі чіткої кластеризації:

dunn_coeff	normalized
0.4203087	0.1304630

В даному випадку  $F_k = 0,42$ , а його нормована версія, що змінюється від 0 до 1 – 0.13.

Побудуємо діаграму. На рис. 2, а наведено ординаційну діаграму з результатами кластеризації.

```
fviz_cluster(res.fanny, frame.type = "norm", frame.level = 0.7)
```

Для подальшого аналізу внесемо у похідні дані 30% пропусків випадковим чином.

### 1. Кластеризація з видаленням пропусків

Перші, середні та останні 10 рядків, отримані за результатами кластеризації, наведено на рис. 1, б.

```
heartMissedNO <- subset(heartMissed, exang != "")
```

Коефіцієнт Dunn приймає значення:

dunn_coeff	normalized
0.4153731	0.1230597

На рис. 2, б наведено ординаційну діаграму з результатами кластеризації.

### 2. Кластеризація із заповненням пропусків вибіровими статистиками

Отже, введемо припущення, що взаємозв'язку між змінними, у даному випадку, немає, тоді ефективним способом заповнення пропусків буде використання середніх значень, для цього оберемо медіану.

```
heartMissedProcess <- heartMissed
ind <- apply(heartMissedProcess, 1, function(x)
sum(is.na(x)) > 0)
heartMissedProcess[ind, 1:8]
pPml <- preProcess(heartMissedProcess[, 1:8], method =
'medianImpute')
heartMissedProcess[, 1:8] <- predict(pPml,
heartMissedProcess[, 1:8])
(imp.Med <- heartMissedProcess[ind, 1:8])
```

Перші, середні та останні 10 рядків, отримані за результатами кластеризації, наведено на рис. 1, в.

Коефіцієнт Dunn приймає значення:

dunn_coeff	normalized
0.38203172	0.07304758

На рис. 2, в наведено ординаційну діаграму з результатами кластеризації.

### 3. Заповнення пропусків з урахуванням структури зв'язків

Попередній метод передбачав відсутність зв'язків між параметрами, це так званий "наївний"

метод. Альтернативою йому можна назвати метод, що враховує зв'язки між параметрами.

Приклад для заповнення поля age:

```
lm(age ~ trestbps, data = heartMissKor)
ageTres <- function(oP) {if (is.na(oP)) return(NA)
else return(34.7253 + 0.1508 * oP)
}
heartMissKor[is.na(heartMissKor$age), 'age'] <-
sapply(heartMissKor[is.na(heartMissKor$age),
'trestbps'], ageTres)
heartMissKor[ind, 10]
```

Перші, середні та останні десять рядків, отримані за результатами кластеризації, наведено на рис. 1, г.

На рис. 2, г наведено ординаційну діаграму з результатами кластеризації при заміні 30% значень з урахуванням структури зв'язків.

Для проведення кластеризації і отримання параметрів на кожному етапі використовувалася функція:

```
kmean <- function(data) {
res.fanny <- fanny(data, k = 3, memb.exp = 1.3,
metric = "euclidean", stand = TRUE, maxit = 500)
print(res.fanny$membership, 3)
res.fanny$coeff
print( res.fanny$coeff)
Dunn <- res.fanny$membership^2
fviz_cluster(res.fanny, ellipse.type = "norm", ellipse.level
= 0.7)
```

## Висновки

В ході роботи було розглянуто методи кластеризації даних з пропусками.

Для проведення аналізу було обрано медичні дані, що складаються з 303 рядків. Для проведення кластеризації оброблених даних обрано метод нечіткої кластеризації  $k$  середніх.

За результатами проведеної роботи можна зробити висновок, що найгіршим варіантом є варіант видалення всіх рядків, які містять пропуски. Даний метод можливий лише у випадках коли вибірка містить мінімальну кількість пропусків, або тоді коли було попередньо проведено інший вид обробки і відбувається видалення залишків пустих значень. Найкращим вважається метод боротьби з пропусками з урахуванням взаємозв'язків між полями, але на даній вибірці він не значно перевершує метод заміни на середні значення.

Якщо порівнювати порівняльні таблиці, що є результатами методу *fanny*, то можна сказати, що обидва методи впоралися добре на даному наборі даних з урахуванням 30% пропусків.

Якщо аналізувати графіки, то можна сказати, що є похибки в кластеризації, відновлення відбулося не ідеально, тому слід враховувати втрату повної достовірності, при виборі одного з таких методів.

Отже, ідеального методу боротьби з неповними даними немає.

Для кожного окремого випадку необхідно детально аналізувати похідний набір даних, що буде найбільш прийнятний у конкретному випадку.



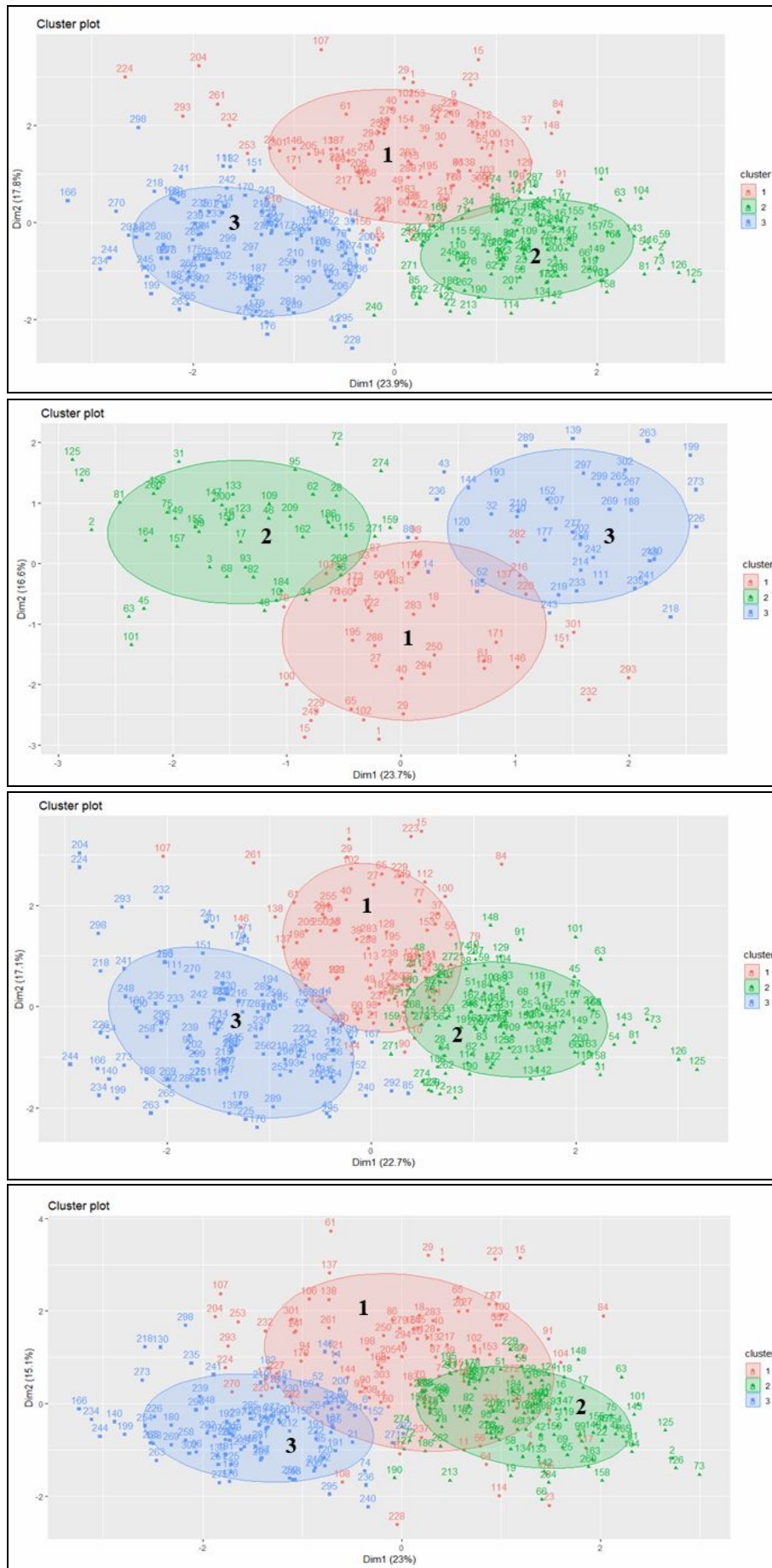


Рис. 2. Графік результатів нечіткої кластеризації: а – всі дані; б – при видаленні 30% даних; в – при заміні 30% значень на медіани; г – при заміні 30% значень з урахуванням структури зв'язків

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шумейко, А. А., & Сотник, С. Л. (2012). Интеллектуальный анализ данных. *Днепропетровск: Белая ЕА*, 212.
2. Жамбю, М., & Айвазян, С. А. (1988). *Иерархический кластер-анализ и соответствия*. Финансы и статистика.
3. Jain, A. K., Murty, M. N., Flynn, P. J. (1999). Data clustering: a review. *ACM computing surveys (CSUR)*, 31(3), 264-323.
4. Steinley, D. (2006). K means clustering a half century synthesis. *British Journal of Math. and Stat. Psychology*, 59(1), 1-34.
5. Huang, Z., & Ng, M. K. (1999). A fuzzy k-modes algorithm for clustering categorical data. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 7(4), 446-452.
6. Schafer, J. L., & Graham, J. W. (2002). Missing data: our view of the state of the art. *Psychological methods*, 7(2), 147.
7. Bodyanskiy, Y., Vynokurova, O., Kobylin, I., & Kobylin, O. (2016). Adaptive fuzzy clustering of short time series with unevenly distributed observations in Data Stream Mining tasks. *Information Technology and Management Science*, 19(1), 23-28.
8. Rabotiahov, A., Kobylin, O., Dudar, Z., & Lyashenko, V. (2018, February). Bionic image segmentation of cytology samples method. In 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) (pp. 665-670). IEEE.
9. Oleg, K., Sergii, M., & Mykhailo, S. (2017, October). Video Clustering via Multidimensional Time-Series Analysis. In *Proceedings of the 9th International Conference on Information Management and Engineering* (pp. 60-63). ACM.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Received (Надійшла) 04.02.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.03.2019

### Обработка данных, содержащих пропуски, в задачах кластеризации

О.А. Кобылин, С.А. Выскребенцева, Р.В. Петрова

**Предметом** исследований являются методы подготовки и обработки входных данных, содержащих пропущенные значения, для их дальнейшего анализа и кластеризации. **Целью** является рассмотрение существующих методов избавления от пропусков в данных в задачах кластеризации и целесообразность их использования в реальных ситуациях. **Задачи:** анализ преимуществ и недостатков каждого из методов, направленных на восстановление данных, для определения целесообразности использования в задачах кластеризации и выделение наиболее подходящего к применению, сравнение их между собой, оценка результативности по результатам сравнения кластеризации восстановленных данных с результатами кластеризации эталонных данных. Применяемыми **методами** являются: FCM, для проведения непосредственно кластеризации данных, метод удаления всех строк, содержащих пропуски, заполнение пропусков выборочными статистиками, заполнение пропусков с учетом структуры связей. Полученные **результаты:** эффективность применения методов при подготовке данных для дальнейшей кластеризации зависит от количества имеющихся пропусков в исходном наборе. Если таких строк достаточно мало, то каждый, из рассмотренных методов, может быть использован и дать необходимые результаты. Но, если строк с пропусками достаточно много, например, 30%, тогда наиболее приемлемыми для использования можно назвать методы, связанные с заменой значений, однако следует учитывать, что такая замена может привести к искажению данных, а в итоге и результатов. **Выводы. Научная новизна** - исследование проблемы кластеризации данных, содержащих пропущенные значения и рассмотрение методов, которые позволяют решить эту задачу. Проведение экспериментов и сравнения результатов каждого из методов, выводы о целесообразности использования того или иного метода и побочные эффекты. **Практическая значимость** работы заключается в определении возможности использования в реальных задачах, которые обычно не являются идеальными и с большой вероятностью содержат пустые значения, методов обработки данных для использования их в задачах кластеризации.

**Ключевые слова:** кластеризация, неполные данные, обработка и анализ данных, Data Mining, FCM, методы восстановления данных, язык программирования R.

### Processing incomplete data in cluster tasks

O.A. Kobylin, S.O. Vyskrebentseva, R.V. Petrova

**The subjects** of research is the methods of preparation and processing of input data containing missing values for their further analysis and clustering. **The goal** is to consider existing methods of getting rid of data gaps in clustering problems and the appropriateness of their use in real situations. **The tasks** include: analysis of advantages and disadvantages of each of the methods aimed at recovering data, to determine the appropriateness of use in clustering tasks and highlighting the most suitable for use, comparing them with each other; performance evaluation by comparing the recovered data clustering with the clustering results of the reference data. **The used methods:** FCM method for direct data clustering, methods of deleting all lines containing omissions, filling in omissions with selective statistics, filling in omissions taking into account the structure of links. The obtained **results:** efficiency of applying the methods to preparing data for further clustering depends on the number of omissions in the original set. If there are few such lines, then each of the considered methods can be used to obtain the necessary results. But, if there are a lot of lines with omissions, for example, 30%, then the methods that are associated with the replacement of values can be called the most acceptable for use, however, it should be borne in mind that this replacement can lead to distortion of the data, and ultimately the results. **Conclusions. Scientific novelty** - investigation of the problem of incomplete data clustering and consideration of methods that can solve this problem. Conducting experiments and comparing the results of each of the methods, conclusions about the advisability of using one of them and side effects. **The practical significance** of the paper consists in determining the possibility to use it in real tasks, which are usually not ideal and most likely contain empty values, data processing methods for using them in clustering tasks.

**Keywords:** clustering, incomplete data, data processing and analysis, Data Mining, FCM, data recovery methods, programming language R.

Н. Г. Кучук, І. С. Зиков, В. І. Панченко

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

## МЕТОД РОЗГАЛУЖЕННЯ ЗАПИТІВ ДО СХОВИЩ ДАНИХ СИСТЕМ, ЩО МАЮТЬ ГІПЕРКОНВЕРГЕНТНУ ІНФРАСТРУКТУРУ

**Актуальність дослідження.** В процесі функціонування комп'ютерної мережі гіперконвергентної архітектури за рахунок централізованого управління збільшується час доступу до сховищ даних. Але для деяких підсистем, особливо для тих, що повинні функціонувати у режимі, наближеному до режиму реального часу, дані показники є дуже суттєвими. **Метою статті** є розробка підходу до зменшення часу доступу до сховищ даних у гіперконвергентному середовищі шляхом розгалуження інформаційних потоків. **Результати дослідження.** Запропонований метод є двохетапним та складається із послідовності кроків знаходження можливих маршрутів та знаходження оптимального із знайдених варіантів розподілу каналів. В результаті знайдено найкращий варіант розподілу пакетів по каналах зв'язку серед таких, що задовольняють сформульованим умовам. Зокрема, максимальний час передачі за допомогою одного з каналів обраного варіанту розподілу не перевищує час, виділений для передачі необхідного обсягу даних та виконані обмеження за продуктивністю та вартістю. **Висновки.** Застосування підходу дозволяє істотно зменшити час передачі даних і витрати на оренду каналів, а також поліпшити живучість мережі.

**Ключові слова:** гіперконвергентна архітектура; сховище даних, час виконання запиту.

### Вступ

**Актуальність завдання.** Розробники великих систем в даний час все більше схиляються до конвергентних і гіперконвергентних рішень для базових комп'ютерних мереж, які за рахунок централізації управління суттєво зменшують витрати на обслуговування [1]. При такому технологічному рішенні передбачається об'єднання пам'яті, обчислювальних, програмних і мережевих ресурсів в пул, заздалегідь об'єднаних для роботи в дата-центрі [2]. Управління відбувається через загальну консоль адміністрування [3]. Перевагами гіперконвергентної інфраструктури є такі:

- 1) спрощення інфраструктури управління – централізація управління сервером, мережевих ресурсів і сховищами даних, що дозволяє оптимізувати повсякденне обслуговування;
- 2) масштабна ємність сховищ даних – усі поширені комутаційні мережі і протоколи вбудовані в гіперконвергентну інфраструктуру, що дозволяє додати в неї додаткові гігабайти простіше і швидше;
- 3) швидка підготовка і виділення ресурсів – скорочення часу підготовки і виділення ресурсів;
- 4) більш швидке реагування інформаційної технології забезпечує гнучкість для реагування на зміни на ринку і зміни пріоритетів у бізнесі;
- 5) спрощений перехід в хмару спрощує впровадження приватних або гібридних хмар;
- 6) підвищений контроль забезпечує одночасне керування кількома функціями і пристроями.

**Постановка завдання.** В процесі функціонування комп'ютерної мережі (КМ) гіперконвергентної архітектури за рахунок централізованого управління збільшується час доступу до сховищ даних (СД). Але для деяких підсистем, особливо для тих, що повинні функціонувати у режимі, наближеному до режиму реального часу, дані показники є дуже суттєвими. Враховуючи особливості гіперконвергентних систем серед багатьох методів, призначених для зменшення часу доставки інформації обрано

методи, що пов'язані із розгалуженням потоку пакетів даних. Таким чином, завдання підвищення оперативності процесу доступу до сховищ даних може бути сформульованим таким чином: необхідно запропонувати метод розгалуження потоку даних по каналах зв'язку системи, котрий враховує особливості гіперконвергентної системи.

**Аналіз літератури.** Для вирішення поставленого завдання пропонується багато різних методів [4–19]. Однак, всі перераховані методи мають порівняно невисоку обчислювальну ефективність, що обмежує рішення поставленого завдання у гіперконвергентному середовищі. У зв'язку з цим, виникає необхідність в розробці відповідного методу.

**Метою статті** є розробка підходу до зменшення часу доступу до сховищ даних у гіперконвергентному середовищі шляхом розгалуження інформаційних потоків.

### Результати досліджень

Систему доступу до сховищ даних (СДСД) гіперконвергентного середовища можна представити у вигляді ієрархічного неорієнтованого графа  $G$  (рис. 1).

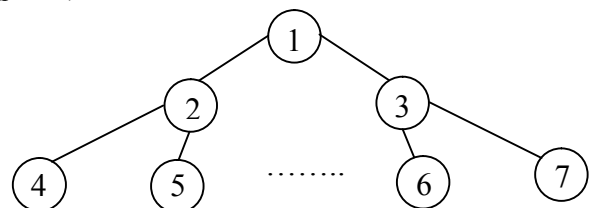


Рис. 1.  $G$  – граф системи доступу до сховищ даних гіперконвергентного середовища

Кожне ребро цього графа є певною підмережею. Дійсно, якщо вузли СДСД знаходяться на досить великій відстані один від одного, магістральний тракт між ними є деякою підмережею, що складається із множини вузлів (комутаторів) і трактів між ними. Кожну із таких підмереж можна представити у вигляді неорієнтованого графа (наприклад,

граф  $G_{13}$  на рис. 2 відповідає ребру між вершинами 1 і 3 графа  $G$ , це потокова мережа із джерелом  $s$ , що відповідає вершині 1 та стоком  $t$ , що відповідає вершині 3). Вимоги, що пред'являються до СДСД, також пред'являються і до таких підмереж.

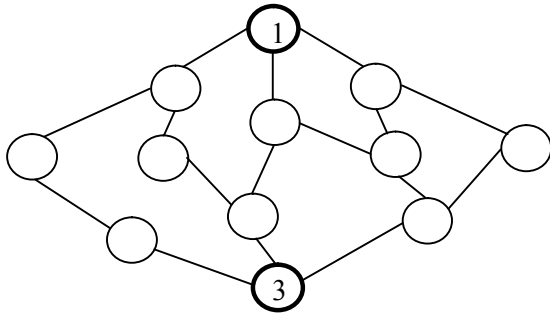


Рис. 2.  $G_{13}$  – граф підмережі

На етапі формування трафіку окремо взятої підмережі зазвичай стоять два завдання, які виходять із вимог оперативності та живучості:

1) необхідно знайти оптимальний маршрут передачі даних при заданій пропускній здатності тракту і вузлів підмережі так, щоб час передачі був не більше заданої величини;

2) підмережа повинна бути  $m$ -зв'язковою (в найпростішому випадку  $m = 2$ ), тобто має бути мінімум  $m$  маршрутів, які відповідають попередній умові і не мають спільних вузлів і тракту.

Для вирішення першого завдання існує багато різних методів пошуку маршруту, наприклад, методи Дейкстри або Флойда [5, 6]. Для вирішення другого завдання можна використовувати запропонований надалі метод пошуку  $m$ -найкоротших шляхів з вихідної вершини джерела  $s$  до вершини стоку  $t$ .

Розглянемо покроково алгоритм цього методу.

**Крок 0.** Покладемо  $k = 1$ , тобто будемо шукати найкоротший шлях із джерела  $s$  до стоку  $t$ . Перед початком виконання алгоритму всі вершини і дуги графа визначаємо як невиділені. Кожній вершині  $x$  надається вага  $d(x)$  таким чином:  $d(s) = 0$  і  $d(x) = \infty$  для всіх  $x$ , відмінних від джерела  $s$  (надалі для виділених вершин вага буде дорівнює довжині найкоротшого шляху із  $s$  до  $x$ , що включає тільки виділені вершини).

**Крок 1.** Виділимо вершину  $s$  і покладемо  $y = s$  ( $y$  - остання з виділених вершин).

**Крок 2.** Для всіх невиділених вершин  $x$ , інцидентних з вершиною  $y$ , перерахуємо вагу  $d(x)$  у таким чином:

$$d(x) = \min(d(x), d(y) + r(x, y)), \quad (1)$$

де  $r(x, y)$  – вага відповідної дуги.

Виділяємо ту із вершин  $x$ , для якої величина  $d(x)$  є найменшою і покладемо  $y = x$ . Якщо ж для всіх розглянутих вершин  $x$  вага  $d(x) = \infty$ , то подальший пошук неможливий і алгоритм закінчує роботу.

**Крок 3.** Якщо  $y \neq t$ , то повертаємося до виконання кроку 2, в іншому випадку  $k$ -й найкоротший шлях з вершини  $s$  до вершини  $t$  знайдений.

**Крок 4.** Якщо  $k < m$ , то покладемо  $k = k + 1$ , з графа  $G$  видалимо вершини, що входять в найко-

ротший маршрут (крім вершин  $s$  і  $t$ ) і переходимо до кроку 1. При  $k = m$  необхідний результат досягнутий і алгоритм закінчує роботу.

Зауважимо, що кожен тракт  $(i, j)$  між двома окремо взятими вузлами  $i$  і  $j$  є сукупністю декількох підтрактів – фізично незалежних ліній зв'язку, таких як повітряні лінії зв'язку, підземний броньований кабель тощо. З метою підвищення живучості та зменшення часу, що витрачається на передачу заданого обсягу даних, пакети можна відправляти не по одному, а по декількох каналах незалежних ліній зв'язку. В основу реалізації даного методу покладений розподіл пакетів між декількома каналами зв'язку. Відправник посилає пакети в канали по черзі: перший пакет в перший канал, другий - у другий і т.д. Одержувач приймає пакети з різних каналів і, використовуючи відповідний механізм, вибудовує їх у порядку відправлення [11]. Тому необхідна чітка синхронізація приймальних і передавальних пристроїв. Для цього в потоки пакетів з призначеною для користувача інформацією вставляються спеціальні пакети, як, наприклад, в технології ATM ICP (IMA Control Protocol, керуючий протокол IMA). Ці пакети нарівні з іншою, призначеною для користувача інформацією, утворюють кадри IMA. Хоча швидкості каналів, що входять в одну групу, є рівними, не існує гарантії, що вставлені пакети будуть отримані одночасно. Тому в більш швидкі канали для вирівнювання швидкостей надсилаються спеціальні порожні клітинки. Мультиплексори одержувача видаляють їх, перш ніж передавати в мережу. Розподіл потоків пакетів по різномісних різномісних каналах незалежних ліній зв'язку дає можливість підвищити живучість мережі, зменшити час доставки пакетів і плату за оренду каналів.

Розглянемо процес передачі даних із використанням наведеного вище алгоритму. Для цього введемо такі позначення:  $V_{IU}$  – обсяг передаваних із сховища даних;  $V_{SU1}$  – службова інформація для формування комірок;  $V_{SU2}$  – службова інформація для формування кадрів;  $V_{SU}$  – потрібний обсяг службової інформації (рис. 3,  $V_{SU} = V_{SU1} + V_{SU2}$ ).

Множину каналів, наявних в даний момент і маючих можливість для отримання даних із сховища, позначимо як

$$I = \{i | i = \overline{1, n}\}, \quad (2)$$

а всі можливі варіанти розподілу каналів ( $I_k$ ), отримані при виконанні наведеного алгоритму, є підмножинами цієї множини, тобто

$$I_k \subset I. \quad (3)$$

Нехай також відомі такі значення:  $V_i$  – обсяг даних, які будуть передані по  $i$ -му каналу,  $i \in I_k$ ;  $T_i$  – час передачі відповідного обсягу  $V_i$   $i$ -м каналом;  $S_i$  – швидкість передачі даних  $i$ -м каналом;  $C_i$  – вартість оренди каналів;  $T_{IU}$  – час, виділений для передачі обсягу  $V_{IU}$ ;  $C_{IU}$  – кошти (фінансування), виділені для оренди каналів.

Зазвичай, значення  $T_i$  відрізняються одне від одного. Визначимо мінімальне серед них

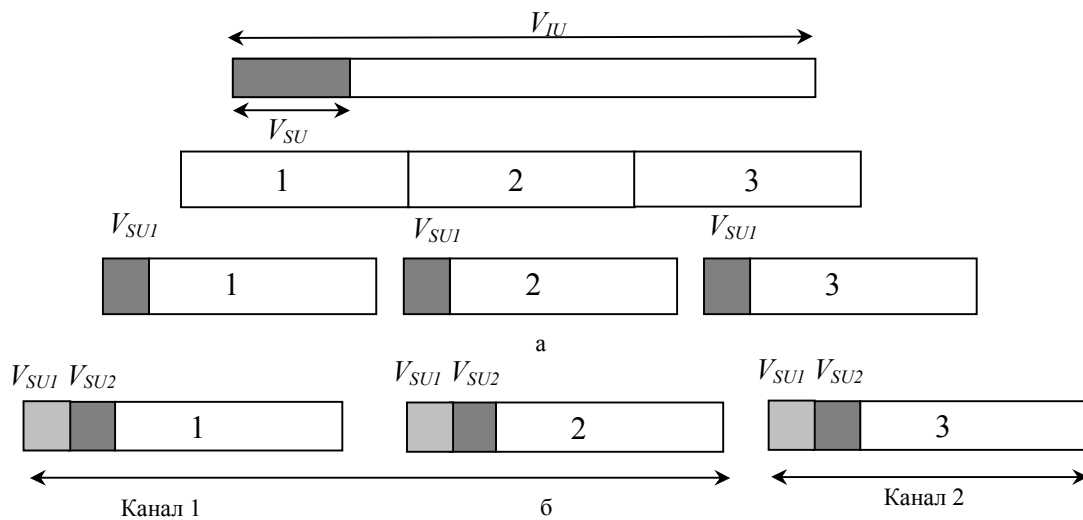


Рис. 3. Формування комірок (а) та кадрів (б)

$$T_{min} = \min_{i \in I_k} (T_i). \quad (4)$$

Це надає можливість отримати значення затримки при передачі пакетів кожним  $i$ -м каналом:

$$\Delta T_i = T_i - T_{min}. \quad (5)$$

Отже необхідно вирішити таку оптимізаційну задачу: знайти найкращий варіант розподілу пакетів по каналах зв'язку серед таких, що задовольняють умові про те, що максимальний час передачі за допомогою одного з каналів обраного варіанту розподілу  $I_k$  не перевищує час, виділений для передачі необхідного обсягу даних  $V_{IU}$ , тобто

$$\max_{i \in I_k} T_i \leq T_{IU}. \quad (6)$$

Крім того, затримки по цих каналах повинні бути зведені до мінімуму, тобто ( $\Delta T_i \rightarrow 0$ ).

$$\max_{i \in I_k} \Delta T_i \rightarrow 0 \quad \forall i \in I_k. \quad (7)$$

Ще одно обмеження: кошти, що витрачаються на оренду каналів не перевищували виділеного фінансування

$$\sum_{j=1}^n C_j \leq C_{IU}, \quad j \in \overline{1, n}. \quad (8)$$

В ході вирішення отриманої оптимізаційної задачі потрібно, щоб відібрані варіанти задовольняли такій умові:

$$\sum_{i=1}^n (V_i + V_{SUI}(i)) - V_{IU} \leq S_{min} \times \Delta t, \quad i \in I_k, \quad (9)$$

де  $\Delta t$  – елементарний проміжок часу, а найменша швидкість передачі серед відібраних каналів є такою:

$$S_{min} = \min_{i \in I_k} S_i. \quad (10)$$

### Висновки

Таким чином, запропонований метод зменшення часу доступу до сховищ даних у гіперконвергентному середовищі шляхом розгалуження інформаційних потоків. Метод є двохетапним та складається із послідовності кроків знаходження можливих маршрутів та знаходження оптимального із знайдених варіантів розподілу каналів.

Відзначимо, що при застосуванні такого підходу виникає ряд труднощів з перерозподілом потоку комірок в таких випадках:

- виродження підмережі (відмова каналів зв'язку і вузлів);
- необхідність повторної передачі, якщо комірка отримана з помилкою;
- будь-який канал почав працювати швидше або повільніше.

**Напрямок подальших досліджень:** розглянутий підхід представляє безперечний інтерес для подальшого вивчення, так як дозволяє істотно зменшити час передачі даних і витрати на оренду каналів, а також поліпшити живучість мережі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. White Paper: Riverbed Hyper-converged Edge, available at: <https://www.riverbed.com/document-repository/white-paper--riverbed-hyper-converged-edge.html>.
2. Черняк, Л. (2012), “Время конвергентных инфраструктур”, Открытые системы. СУБД, № 4, available at: <https://www.osp.ru/os/2012/04/13015754/>.
3. Ганьжа, Д. (2016), “Гиперконвергенция: ИТ-инфраструктура на раз, два, три”, /Журнал сетевых решений., № 5, available at: [www.osp.ru/lan/2016/05/13049349](http://www.osp.ru/lan/2016/05/13049349).
4. Кучук Г. А. Концептуальный подход до синтезу структуры информационно-телекоммуникационной сети / Г. А. Кучук, I. В. Рубан, О. П. Давікоза // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС, 2013. – Вип. 7 (114). – С. 106 – 112.
5. Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. – К.: Наук. думка, 1985. – 520 с.
6. Gelenbe E. Analysis and synthesis of computer systems (2nd Edition) / E. Gelenbe, G. Pujolle // Advances in Computer Science and Engineering : Texts – Vol.4 – 2010. – 309 p.
7. Whitt W. The Queuing Network Analyzes / W. Whitt // Bell System Tech. I. – 1983. – Vol. 62, № 9. – P. 2779 – 2815.

8. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
9. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
10. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НІУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
11. Saravana, Balaji B., Mohamed, Uvaze Ahamed, Eswaran C. and Kannan R., (2019), “Prediction-based Lossless Image Compression”, *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics* (Springer), Vol. 30, No 1, pp.1749 – 17961, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00665-5\\_161](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00665-5_161)
12. Sivaram, M., Batri, K., Amin Salih, Mohammed and Porkodi V. (2019), “Exploiting the Local Optima in Genetic Algorithm using Tabu Search”, *Indian Journal of Science and Technology*, Volume 12, Issue 1, doi: <http://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i1/139577>
13. Ruban, I. Redistribution of base stations load in mobile communication networks / I. Ruban, H. Kuchuk, A. Kovalenko // *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. – 2017. – No 1 (1) – P. 75-81.
14. 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.
15. 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.
16. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. ЛуковаЧуйко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
17. Sivaram, M., Yuvraj, D., Amin Salih, Mohammed, Porkodi, V. and Manikandan V. (2018), “The Real Problem Through a Selection Making an Algorithm that Minimizes the Computational Complexity”, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 8, iss. 2, 2018, pp. 95-100.
18. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study”, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
19. Kosenko V. Mathematical model of optimal distribution of applied problems of safety-critical systems over the nodes of the information and telecommunication network. *Сучасні інформаційні системи (Advanced Information Systems)*. 2017. Т. 1, № 2. С. 4-9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.01>

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. А. А. Коваленко,

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Received (Надійшла) 16.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.09.2019

### Метод разветвления запросов к хранилищам данных систем с гиперконвергентной инфраструктурой

Н. Г. Кучук, И. С. Зыков, В. И. Панченко

**Актуальность исследования.** В процессе функционирования компьютерной сети гиперконвергентной архитектуры за счет централизованного управления увеличивается время доступа к хранилищам данных. Но для некоторых подсистем, особенно для тех, которые должны функционировать в режиме, приближенном к режиму реального времени, данные показатели являются очень существенными. **Целью статьи** является разработка подхода к уменьшению времени доступа к хранилищам данных в гиперконвергентной среде путем разветвления информационных потоков. **Результаты исследования.** Предложенный метод является двухэтапным и состоит из последовательности шагов нахождения возможных маршрутов и нахождения оптимального из найденных вариантов распределения каналов. В результате найден лучший вариант распределения пакетов по каналам связи среди тех, что удовлетворяют сформулированным условиям. В частности, максимальное время передачи с помощью одного из каналов выбранного варианта распределения не превышает время, выделенное для передачи необходимого объема данных и выполнены ограничения по производительности и стоимости. **Выводы.** Применение подхода позволяет существенно уменьшить время передачи данных и расходы на аренду каналов, а также улучшить живучесть сети.

**Ключевые слова:** гиперконвергентная архитектура, хранилище данных, время выполнения запроса.

### Method of branching requests to data system stores with hyperconvergent infrastructure

N. Kuchuk, I. Zikov, V. Panchenko

**The relevance of research.** In the process of functioning of the computer network of the hyper-converged architecture due to the centralized management, the access time to the data warehouses is increased. But for some subsystems, especially those that are supposed to function in real-time mode, these figures are very significant. **The purpose of the article** is to develop an approach to reducing access time to data warehouses in a hyper-converged environment by branching information flows. **Results of the research.** The proposed method is two-step and consists of a sequence of steps to find possible routes and find the best of the found channel distribution options. As a result, we found the best variant of packet distribution over the communication channels among those that satisfy the formulated conditions. In particular, the maximum transmission time by one of the channels of the selected distribution option does not exceed the time allocated to transmit the required amount of data and the performance and cost constraints are met. **Conclusions.** The approach can significantly reduce data transmission time and channel rental costs, as well as improve network viability.

**Keywords:** hyperconvergent architecture, data warehouse, query time.

Н. В. Лада<sup>1</sup>, С. Г. Козловська<sup>2</sup>, В. М. Зажома<sup>3</sup>, С. В. Висоцький<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

<sup>2</sup> Східноєвропейського університету економіки і менеджменту, Черкаси, Україна

<sup>3</sup> Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, Черкаси, Україна

## СИНТЕЗ АПАРАТНИХ ЗОСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ГРУП СИМЕТРИЧНИХ ДВОХОПЕРАНДНИХ ОПЕРАЦІЙ ПОТОКОВОГО ШИФРУВАННЯ

Стаття присвячена розробці технології синтезу апаратних засобів для генерації груп симетричних двохоперандних двохоперандних криптографічних операцій для підвищення якості потокового шифрування. Наведено результати дослідження по реалізації симетричних операцій потокового шифрування. Розроблено функціональні схеми пристроїв генерації і застосування груп операцій додавання за модулем два, та чотири. Дані групи операцій можуть застосовуватися, як окремо, так і сумісно. Застосування розроблених апаратних засобів при вдосконаленні реалізації методу підвищення стійкості та надійності потокового шифрування забезпечує збільшення варіативності шифрування в п'ять раз.

**Ключові слова:** криптографічне кодування, потокове шифрування, синтез груп криптоперетворення, додавання за модулем, функціональна схема.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день в світі відбувається глобальна інформатизація суспільства. Особливо актуальними стають питання високоєфективного захисту інформації, особливо криптографічного. Крім того, сучасні тенденції постійного збільшення обсягів інформації та швидкості її обробки та передачі, обумовлені розвитком нових інформаційних технологій, вимагають відповідного розвитку засобів потокового шифрування [1-3].

Сучасні наукові дослідження в сфері криптографічного захисту інформації все більше уваги приділяють розвитку потокових шифрів, зокрема пов'язаному з вирішенням задач апаратної генерації високоякісних псевдовипадкових послідовностей та побудови нових логічних операцій криптографічного перетворення інформації, дослідженням їх побудови або використанням арифметичних операцій з різними модулями [1, 4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз методів синтезу однооперандних операцій криптографічного перетворення інформації показав що не залежно від операцій які синтезуються, алгоритм синтезу можна поділити на блок синтезу однооперандних операцій базової групи, блок синтезу операцій перестановки, блок синтезу операцій інверсії [5, 6]. Дані блоки доповнюють один одного і розширюють кількість операцій. Особливості реалізації кожного методу синтезу операцій визначається особливостями синтезу операцій базової групи. Технічній реалізації однооперандних операцій присвячено ряд робіт [7-12]. Особливої уваги заслуговують дослідження присвячені та синтезу апаратних засобів генерації однооперандних операцій [13, 14]. Проте синтезу апаратних засобів генерації груп двохоперандних операцій не приділялося достатньої уваги.

**Метою роботи** є розробка технології синтезу апаратних засобів для генерації груп симетричних двохоперандних двохоперандних криптографічних операцій для підвищення якості потокового шифрування.

### Основний матеріал

Для досягнення поставленої мети в процесі аналізу методів синтезу математичних груп симетричних двохоперандних двохоперандних операцій потокового шифрування на основі додавання за модулем два і додавання за модулем чотири [2, 15] встановлено наступне:

- синтез двохоперандних операцій проводиться аналогічно синтезу однооперандних операцій шляхом побудови операцій базової групи, поєднанням операцій базової групи з групою операцій перестановки та поєднання отриманої групи операцій з групою операцій інверсії;

- синтез групи двохоперандних операцій реалізується на основі групи однооперандних операцій, шляхом поєднання однакових однооперандних операцій обробки першого та другого операнда;

- методи синтезу базових груп симетричних двохоперандних двохоперандних операцій потокового шифрування на основі додавання за модулем два і додавання за модулем чотири відрізняються правилами поєднання однакових однооперандних операцій;

- правила поєднання операцій базової групи з операціями групи перестановки та групи інверсії аналогічні правилам поєднання при синтезі однооперандних операцій.

Виходячи з цього апаратні засоби формування групи симетричних двохоперандних двохоперандних операцій потокового шифрування повинні включати схему формування базових операцій, схему реалізації операцій перестановки та схему реалізації операцій інверсії.

Синтез базової групи симетричних двохоперандних двохоперандних операцій потокового шифрування на основі додавання за модулем два проводиться з врахуванням взаємозв'язків між однооперандними операціями обробки операндів, які опи-

суються моделлю  $F = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$ . Моделі симетричних двохоперандних двохоперандних операцій базової

групи які необхідно реалізувати в пристрої генерації групи операцій додавання за модулем два такі:

$$O_{16}^{\oplus 2} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$O_{26}^{\oplus 2} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$O_{36}^{\oplus 2} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \\ k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus k_1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Виходячи з виразів (1-3) апаратні засоби формування групи операцій повинні включати блок формування двоопераційних операцій із одноопераційних. В даному випадку він повинен об'єднувати, шляхом додавання за модулем два, бітів операндів з однаковими номерами. На основі даного підходу побудовано функціональну схему пристрою реалізації груп операцій додавання за модулем два представлену на рис. 1.

Побудована функціональна схема пристрою розбита на чотири функціонально незалежні модулі: блок формування двоопераційних операцій на основі одноопераційних шляхом додавання відповідних розрядів операндів за модулем два (об'єднуються відповідні розряди першого операнда  $x_1$  і  $x_2$ , з відповідними розрядами другого операнда  $k_1$  і  $k_2$ ); схеми формування операцій базової групи (схема працює в залежності від значень команди управління заданої вхідними сигналами  $z_1$  і  $z_2$ ); схеми управління перестановками (перестановка задається значенням вхідного сигналу  $z_3$ ); та схеми управління інверсіями (наявність інверсій виходів визначається сигналами управління  $z_4$  і  $z_5$ ). Три останні схеми умовно можна поєднати в об'єднаний блок формування групи операцій. Функціональна схема пристрою реалізації груп операцій додавання за модулем два працює наступним чином: при подачі на входи інформації та сигналів управління на виході буде результат виконання операції заданої сигналами управління.

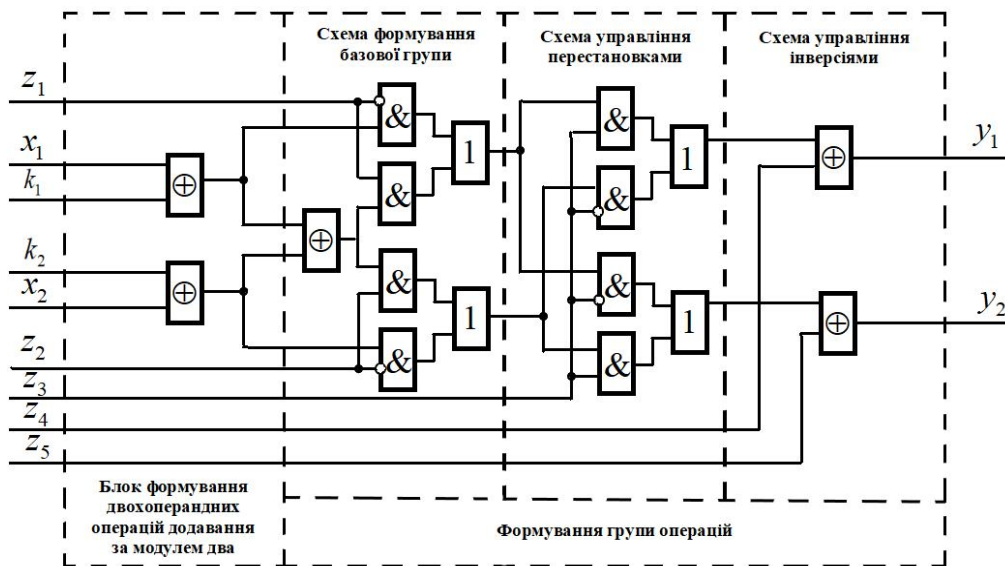


Рис. 1. Функціональна схема пристрою реалізації груп операцій додавання за модулем два

Синтез групи операцій додавання за модулем чотири відрізняється від синтезу групи операцій додавання за модулем два побудовою операцій базової групи на основі моделі  $F = \begin{bmatrix} k_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ k_2 \end{bmatrix}$ :

$$O_{16}^{\oplus 4} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} k_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$O_{26}^{\oplus 4} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$O_{26}^{\oplus 4} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \\ x_2 \oplus k_2 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$O_{36}^{\oplus 4} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_2 \cdot k_2 \oplus k_1 \oplus k_2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Виходячи з (4-6) апаратні засоби формування групи операцій додавання за модулем чотири можна представити функціональною схемою рис. 2. Дана функціональна схема відрізняється від рис. 1 лише блоком формування двоопераційних операцій за модулем. Даний блок забезпечує поєднання операцій відповідно до методу синтезу групи другої операцій. Схеми формування групи операцій залишені без змін. Функціонування даної схеми аналогічно попередній. Об'єднавши під управлінням сигналу  $z_6$  поєднання блоків формування двоопераційних операцій додавання за модулем два та чотири було отримано функціональну схему пристрою реалізації груп операцій додавання за модулями два та чотири (рис. 3).



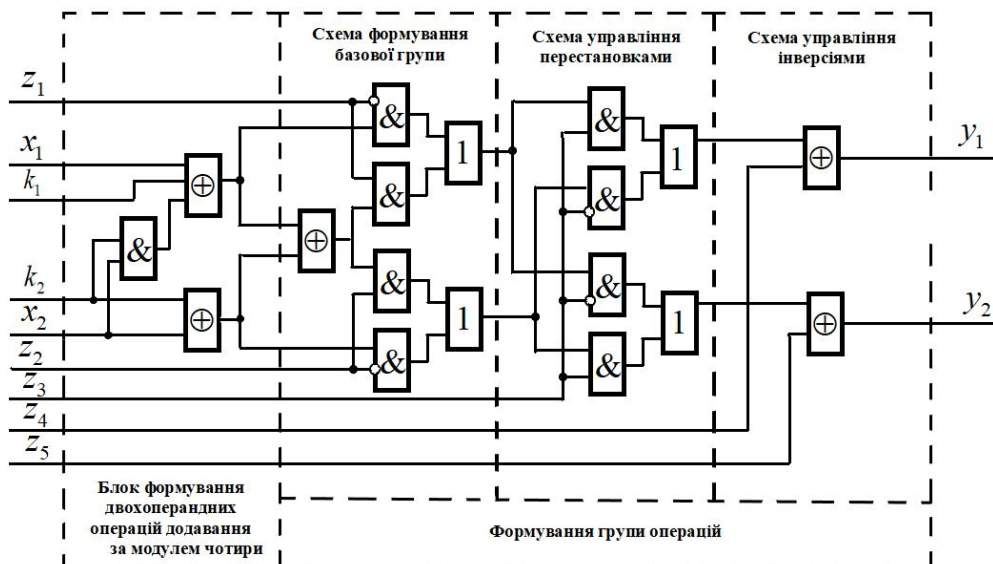


Рис. 2. Функціональна схема пристрою реалізації груп операцій додавання за модулем чотири

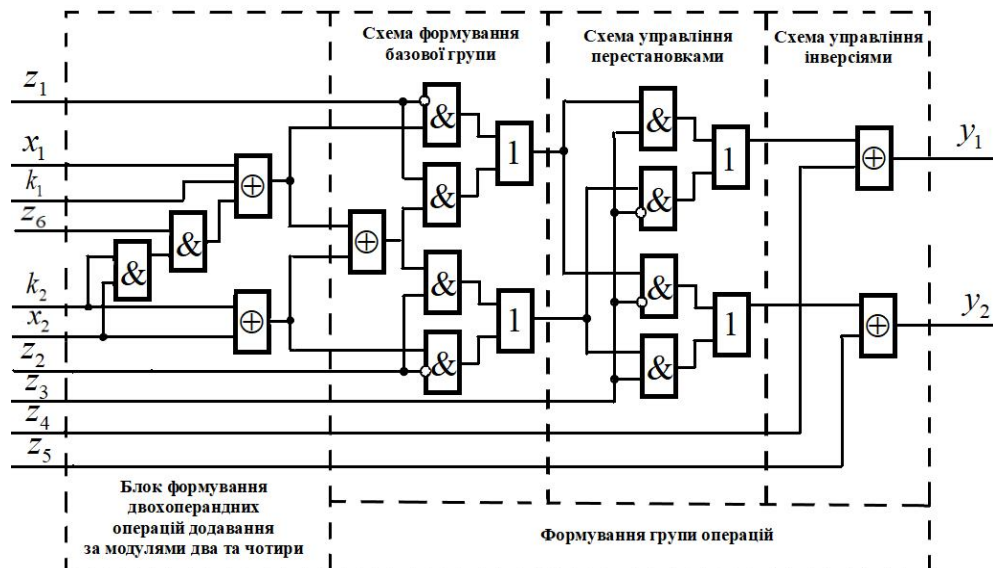


Рис. 3. Функціональна схема пристрою реалізації груп операцій додавання за модулями два та чотири

Дана функціональна схема реалізує 48 симетричних двохранних двооперандних операцій криптоперетворення замість 24, що реалізують дві попередні функціональні схеми.

В процесі дослідження було встановлено, що побудований пристрій доцільно застосовувати в блоці криптоперетворення інформації при реалізації методу підвищення стійкості та надійності потокового шифрування [3].

В процесі дослідження встановлено що сумісне застосування операцій збільшує кількість операцій з 12 до 60, і як наслідок, в 5 раз збільшує варіативність алгоритму потокового шифрування.

### Висновки

Побудова апаратних засобів генерації математичних груп симетричних двооперандних двохранних операцій потокового шифрування по аналогії повинна відображати концепцію синтезу математичних груп операцій і включати в себе побудову блоків генерації операцій базової групи, генерації

операцій перестановки та генерації операцій інверсії.

Розроблено функціональну схему пристрою реалізації груп операцій додавання за модулем два, яка реалізує синтез 24 симетричних операцій потокового шифрування в залежності від сигналів управління. Розроблено функціональну схему апаратного синтезу 24 симетричних операцій потокового шифрування на основі додавання за модулем чотири. Розроблено функціональну схему пристрою сумісної реалізації груп операцій додавання за модулем два та модулем чотири.

Розглянутий підхід до побудови розглянутих апаратних засобів можна трактувати як технологію синтезу апаратних засобів генерації груп симетричного двооперандних двохранних операцій потокового шифрування. Застосування розроблених апаратних засобів при вдосконаленні реалізації методу підвищення стійкості та надійності потокового шифрування забезпечує збільшення варіативності шифрування в 5 раз.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лада Н.В., Козловська С.Г. Застосування операцій криптографічного додавання за модулем два з точністю до перестановки в потокових шифрах. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2018. Т. 1 (47). С. 127-130.
2. Рудницький В.М. Криптографічне кодування: обробка та захист інформації: колективна монографія. Харків: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. 139 с.
3. Рудницький В.М., Лада Н.В., Бабенко В.Г. Криптографічне кодування: синтез операцій потокового шифрування з точністю до перестановки: монографія. Харків: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. 184 с.
4. Бабенко В.Г., Лада Н.В. Синтез і аналіз операцій криптографічного додавання за модулем два. Системи обробки інформації: зб. наук. пр. Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2014. Вип. 2 (118). С. 116-118.
5. Бабенко В.Г., Дахно Т.В., Рудницький В.М. Алгоритми синтезу логічних функцій для систем захисту інформації. Інтегровані інформаційні технології та системи (ІТС-2007). К.: НАУ, 2007. С.46-48
6. Рудницький В.Н., Пивнева С.В., Бабенко В.Г., Миронец І.В. и др. Криптографическое кодирование: методы и средства реализации: монография. Тольятт. гос. ун-т. Тольятти, 2013. 196 с.
7. Рудницький В.М., Бабенко В.Г. Математичне моделювання дискретних пристроїв для систем інформаційної безпеки. Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007». Харків: НАУ ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2007. С. 227-229.
8. Бабенко В.Г. Параллельная реализация скользящего шифрования. Системи обробки інформації: зб. наук. пр. Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2013. Вип. 9(116). С. 131-134.
9. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22-27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
10. Рудницький В.М., Лада Н.В., Федотова-Півень І.М., Пустовіт М.О. Синтез обернених дворозрядних двооперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування. Системи та методи обробки інформації. Збірник наукових праць. Київ: ДНДІ МВС України, 2018. Вип. 4(55). С. 76-81.
11. Mozhaev O. Multiservice network security metric / O. Mozhaev, H. Kuchuk, N. Kuchuk, M. Mozhaev, M. Lohvynenco // IEEE Advanced information and communication technologies-2017. Proc. of the 2th Int. Conf. – Lviv, 2017. – P. 133-136.
12. Semenov, S., Sira, O., Kuchuk, N. (2018), "Development of graphicanalytical models for the software security testing algorithm", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol 2, No 4 (92), pp. 39-46, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127210>
13. Пристрій для виконання логічних операцій криптографічного перетворення. Деклараційний патент на корисну модель 45916 Україна, МПК Н03М 13/00. - № u200907997; Заявл. 29.07.2009; Опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22.
14. Пристрій для виконання логічних операцій криптографічного перетворення. Деклараційний патент на корисну модель 45917 Україна, МПК Н03М 13/00. - № u200907998; Заявл. 29.07.2009; Опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22.
15. Бабенко В. Г. Дослідження матричних операцій криптографічного перетворення на основі арифметичних операцій за модулем. Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. праць. К., 2012. Вип. 4 (24). С. 85-88.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
 Національний технічний університет «ХПІ», Харків  
 Received (Надійшла) 12.08.2019  
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.09.2019

### Синтез аппаратных средств реализации групп симметрических двооперандных операций поточного шифрования

Н. В. Лада, С. Г. Козловская, В. М. Жакома, С. В. Висоцкий

Статья посвящена разработке технологии синтеза аппаратных средств для генерации групп симметричных двухоперандных двохрозрядных криптографических операций для повышения качества потокового шифрования.

Приведены результаты исследования по реализации симметричных операций потокового шифрования. Разработаны функциональные схемы устройств генерации и применения групп операций сложения по модулю два и четыре. Данные группы операций могут применяться как отдельно, так и совместно. Применение разработанных аппаратных средств при совершенствовании реализации метода повышения устойчивости и надежности потокового шифрования обеспечивает увеличение вариативности шифрования в пять раз.

**Ключевые слова:** криптографическое кодирование, потоковое шифрование, синтез групп криптопреобразования, сложение по модулю, функциональная схема.

### Synthesizing the hardware implementation means for groups of symmetric two-operand stream ciphering operations

N. Lada, S. Kozlovska, V. Zazhoma, S. Vysotskyi

The article is devoted to the technology's development for synthesizing the hardware means to generate the groups of symmetric two-operand two-bit cryptographic operations for the quality of stream ciphering improvement. The research results of stream ciphering symmetric operations implementation are presented. The generation and application devices' functional diagrams for groups of modulo-2 and modulo-4 addition operations are developed. These groups of operations can be applied individually as well as jointly. Applying the developed hardware means increases the encryption variability by five times at improving the application of the stream ciphering stability and reliability increasing method.

**Keywords:** cryptographic coding, streaming encryption, synthesis of cryptoconversion groups, adding by module, functional diagram.

О. М. Маковейчук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СТІЙКИХ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

**Предметом** вивчення в статті є маркери доповненої реальності. **Метою** є розробка науково-прикладних основ побудови стійких маркерів доповненої реальності на основі системи моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах зовнішніх впливів. **Завдання:** аналіз переваг та недоліків існуючих маркерів доповненої реальності, формулювання основних вимог до маркера доповненої реальності, дослідження системи моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах зовнішніх впливів. Використовуваними **методами** є: методи цифрової обробки зображень, теорії ймовірності, математичної статистики, криптографії та захисту інформації, математичний апарат теорії матриць. Отримані такі **результати**. Визначені переваги та недоліки основних існуючих типів маркерів доповненої реальності. Сформульовано вимоги, яким повинні задовольняти маркери доповненої реальності. Запропоновано система моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах зовнішніх впливів. **Висновки.** Напрямами подальших досліджень є розробка методу формування стійкого маркера доповненої реальності; розробка методу виявлення стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності; розробка методу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності; розробка методу проектування віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності; розробка інформаційної технології використання мозаїчних стохастичних маркерів у системах доповненої реальності.

**Ключові слова:** маркер, код, доповнена реальність, віртуальна реальність, моделі, методи, вимоги, робастність, виявлення, декодування.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Згідно прогнозів банку Goldman Sachs [1] (рис. 1) щодо розвитку ринку систем віртуальної та доповненої реальності до 2025-го року за обсягом оборотів і прибутку ринок буде поділений на такі сегменти (в порядку спадання): ігри, медицина, освіта, військова сфера, виробництво і транспорт, кіно і телебачення, онлайн-трансляції, підготовка та навчання співробітників, маркетинг і реклама, роздріб/онлайн-комерція, торгівля нерухомістю. З рис. 1 видно, що ринок систем доповненої реальності наблизився до ринку поставки планшетів, але ще суттєво відстає від ринку поставки смартфонів.

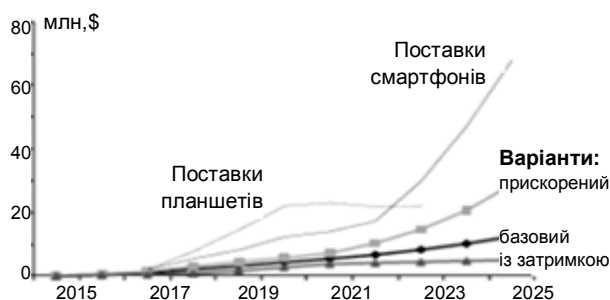


Рис. 1. Прогноз банку Goldman Sachs щодо розвитку ринку систем віртуальної та доповненої реальності

Теоретично AR-маркером може бути будь-яка фігура (об'єкт), але на практиці вибір маркера обмежений роздільною здатністю камери, особливостями передачі кольору, освітлення і обчислювальною потужністю обладнання [2]. Тому для роботи у реальному часі вибирається зазвичай чорно-білий маркер простої форми. Як правило це прямокутник або квадрат з вписаним всередину образом-ідентифікатором [2].

Існуючі типи AR-маркерів мають певні переваги і недоліки, а саме [3]:

- всі вони дозволяють визначати положення камери, але для цього використовуються різні методи:
  - знаходження кутів зображення (шаблонні);
  - знаходження спеціальних областей прив'язки (штрих-кодові і колові);
  - знаходження особливих точок зображення і їх дескрипторів (зображення);
  - частина з них (штрих-кодові і колові) містить додаткову інформацію (повідомлення), наприклад, посилання в Інтернеті, що є однозначною перевагою, оскільки дозволяє розширити область застосування.

**Мета статті** – розробка науково-прикладних основ побудови стійких маркерів доповненої реальності на основі системи моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах зовнішніх впливів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Типова методика обробки шаблонного маркера складається з таких кроків (рис. 2) [4, 5]:

- перехід в градації сірого;
- визначення порогу і бінаризація зображення;
- знаходження замкнутих областей;
- виділення контурів;
- знаходження кутів маркера;
- знаходження параметрів проективного перетворення і перетворення координат.

Методика роботи з штрих-кодовими маркерами передбачає обов'язкове використання коду корекції помилок (у даному випадку – це коди Ріда-Соломона (рис. 3 [4, 5])).

Недоліком маркерів-зображень є неможливість закодувати в ньому додаткове повідомлення, що обмежує галузь їх застосування [6, 7]. Також методи їх обробки мають вищу обчислювальну складність.

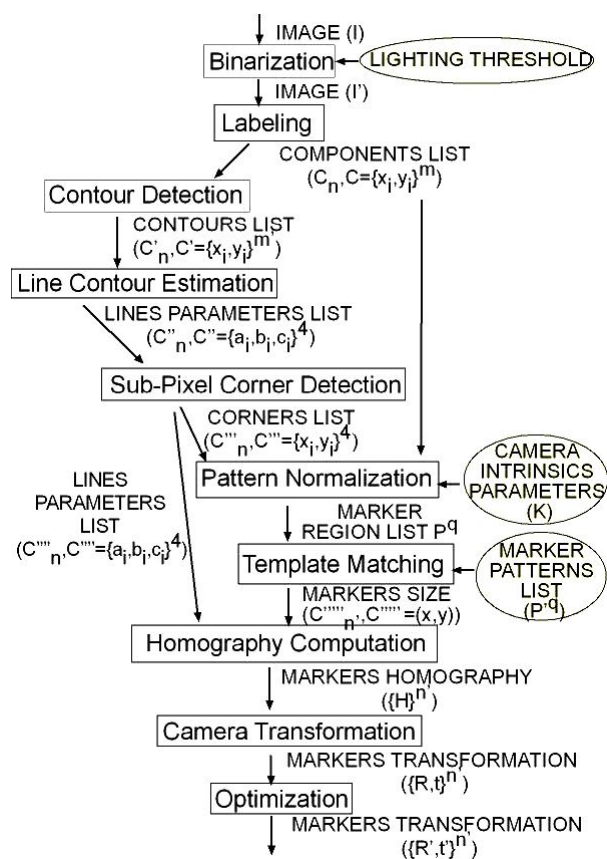


Рис. 2. Блок-схема типової методики обробки шаблонних маркерів [4, 5]

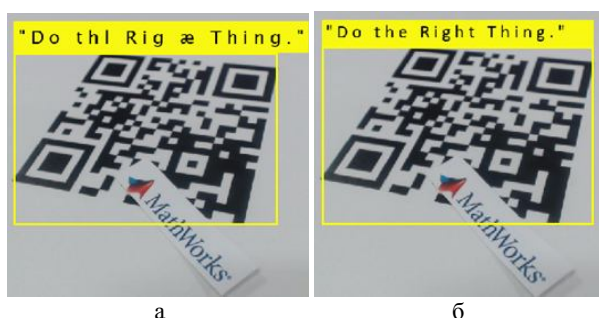


Рис. 3. Результат декодування QR-коду [4, 5]: а – без використання кодів Ріда-Соломона; б – з використанням кодів Ріда-Соломона

В [3] сформульовано основні вимоги до нового типу AR-маркера, а саме:

- 1) легко і швидко знаходиться у відео-потіці;
- 2) використовується мінімальна кількість кольорів, ще краще – градації сірого;
- 3) містить додаткову інформацію (повідомлення);
- 4) дозволяє визначити положення камери;
- 5) пункти 3 і 4 виконуються при втраті до 50% інформації про маркер (наприклад, при закритті його завадою чи фізичній відсутності будь-якої частини маркера).

### Основна частина

Для порівняння ефективності використання стійких мозаїчних маркерів із іншими типами візуальних маркерів доповненої реальності необхідно

кількісно оцінити наскільки кожен тип маркерів задовольняє основним функціональним вимогам.

У табл. 1 наведено запропоновані кількісні критерії для кожного функціонального показника.

Таблиця 1 – Критерії оцінки показників ефективності

Показник	Критерій оцінки
Помітність	Середній час детекції тестового AR-маркера в однакових умовах спостереження, сек.
Простота	Кількість кольорів (градацій сірого), число
Інформативність	Довжина повідомлення, що закодовано у маркері, біт
Орієнтованість	Можливість визначення положення камери, так/ні
Робастність	Кількість помилок декодування повідомлення (в залежності від типу і рівня помилок), число
Криптовійкість	Середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації, число
Універсальність	Кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера, число

Розглянемо в IDEF0-нотації основний процес застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності (рис. 4).

Вхід процесу – сцена доповненої реальності, що представляє собою область реального світу, де знаходиться користувач. Сцена містить в області прямої видимості мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності.

Управління представляє собою набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптовійкості та універсальності); специфікації смартфона; математичні і чисельні методи (методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінарзації, методи сегментації).

Механізмами є сам користувач, смартфон, система програмування MATLAB, що використовується для прототипування процесів, а також спеціалізовані модулі MATLAB, такі як Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Optimization Toolbox.

На виході маємо декодоване повідомлення, віртуальний 3d-об'єкт, що проектується на площину AR-маркера, процес рендерингу відео-потіку в області AR-маркера.

Декомпозиція основного процесу передбачає проведення двох підпроцесів першого рівня (рис. 5):

- 1) сфотографувати AR-маркер:
  - вхід – AR-сцена;
  - вихід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
  - управління – набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптовійкості та універсальності); специфікації смартфона;
  - механізми – користувач, смартфон;

2) використати AR-маркер:  
 – вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;  
 – вихід – декодоване повідомлення, віртуальний 3d-об’єкт, що проектується на площину AR-маркера, процес рендерингу відео-потoku в області AR-маркера;

– управління – набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності); специфікації смартфона; математичні і чисельні методи (методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації);

– механізми – система програмування MATLAB, що використовується для прототипування, спеціалізовані модулі MATLAB (Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Optimization Toolbox).

Декомпозиція підпроцесу використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності поділяється на три підпроцеси другого рівня (рис. 6):

1) декодувати повідомлення:  
 – вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;  
 – вихід – повідомлення;  
 – управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, робастності, універсальності; методи бінаризації, методи сегментації, методи оптимізації, дискретна математика, математична морфологія;

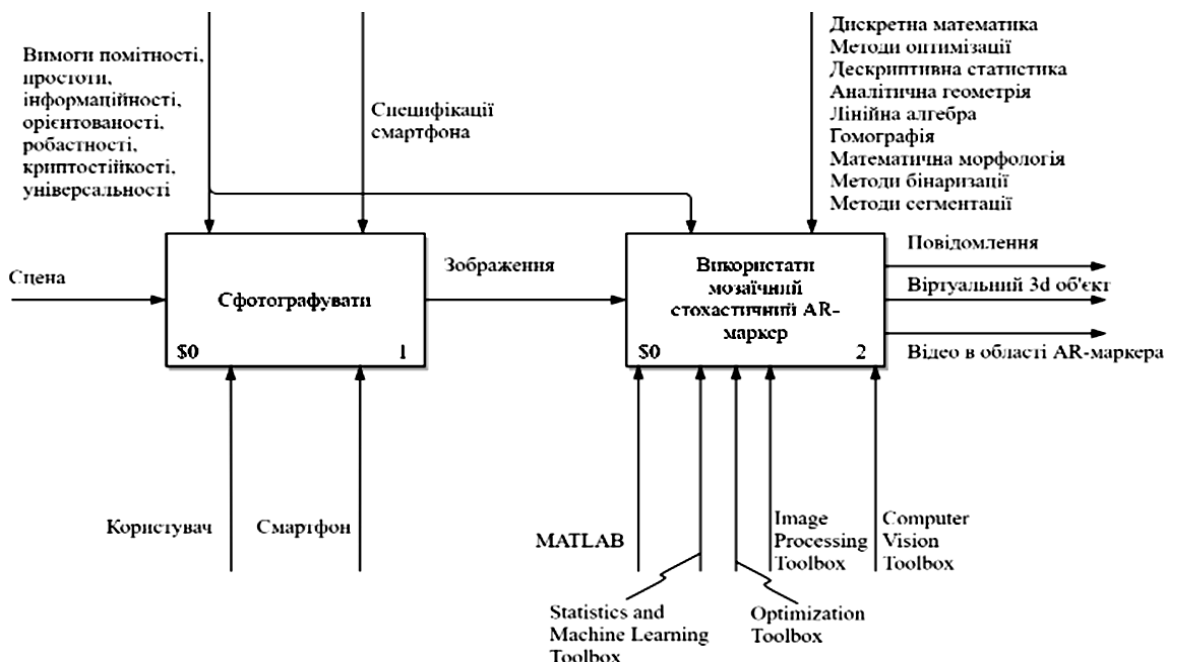


Рис. 5. Декомпозиція основного процесу застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

Рис. 4. Основний процес використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

– механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

2) побудувати віртуальний 3d-об’єкт:  
 – вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;

– вихід – зображення віртуального 3d-об’єкта;  
 – управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації;

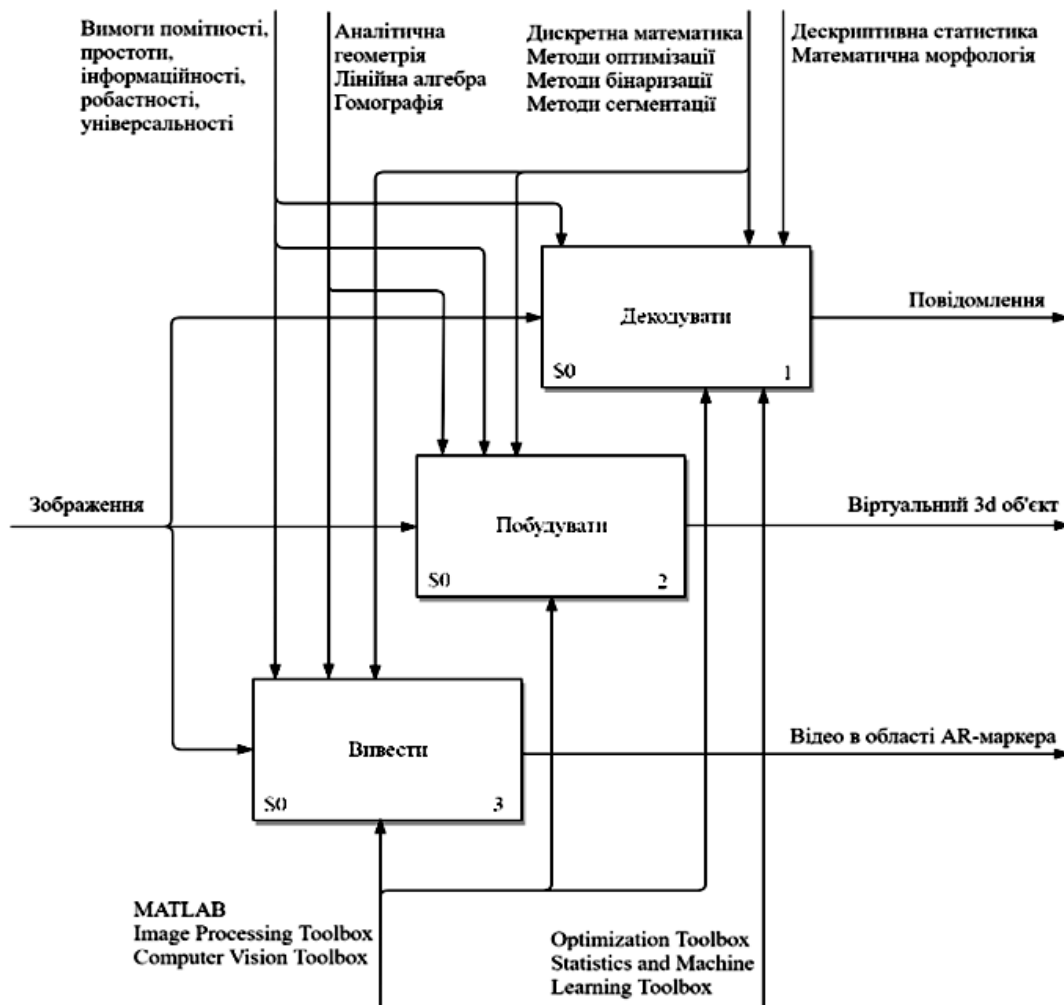


Рис. 6. Декомпозиція підпроцесу використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

3) вивести відео-потік в області AR-маркера:

– вхід – зображення мозаїчного AR-маркера;

– вихід – процес рендерингу відеопотоку в області AR-маркера;

– управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності; методи дискретної математики, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox.

Декомпозиція підпроцесу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності поділяється на три підпроцеси третього рівня (рис. 7):

1) детектувати AR-маркер:

– вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;

– вихід – маска AR-маркера;

– управління – вимоги помітності, простоти, робастності, універсальності; методи дискретної математики, дескриптивна статистика, математична морфологія, методи бінаризації;

– механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox;

2) знайти біт-контейнери:

– вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;

– вихід – об'єднання масок біт-контейнерів;

– управління – вимоги помітності, простоти, робастності, універсальності; методи дискретної математики, математична морфологія, методи сегментації;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

3) декодувати повідомлення:

– вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера, маски біт-контейнерів, об'єднання масок біт-контейнерів;

– вихід – повідомлення;

– управління – вимоги інформативності, робастності, криптостійкості та універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія;

– механізми – MATLAB; Optimization Toolbox, Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox.

Декомпозиція підпроцесу детектування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності поділяється на три підпроцеси четвертого рівня (рис. 8):

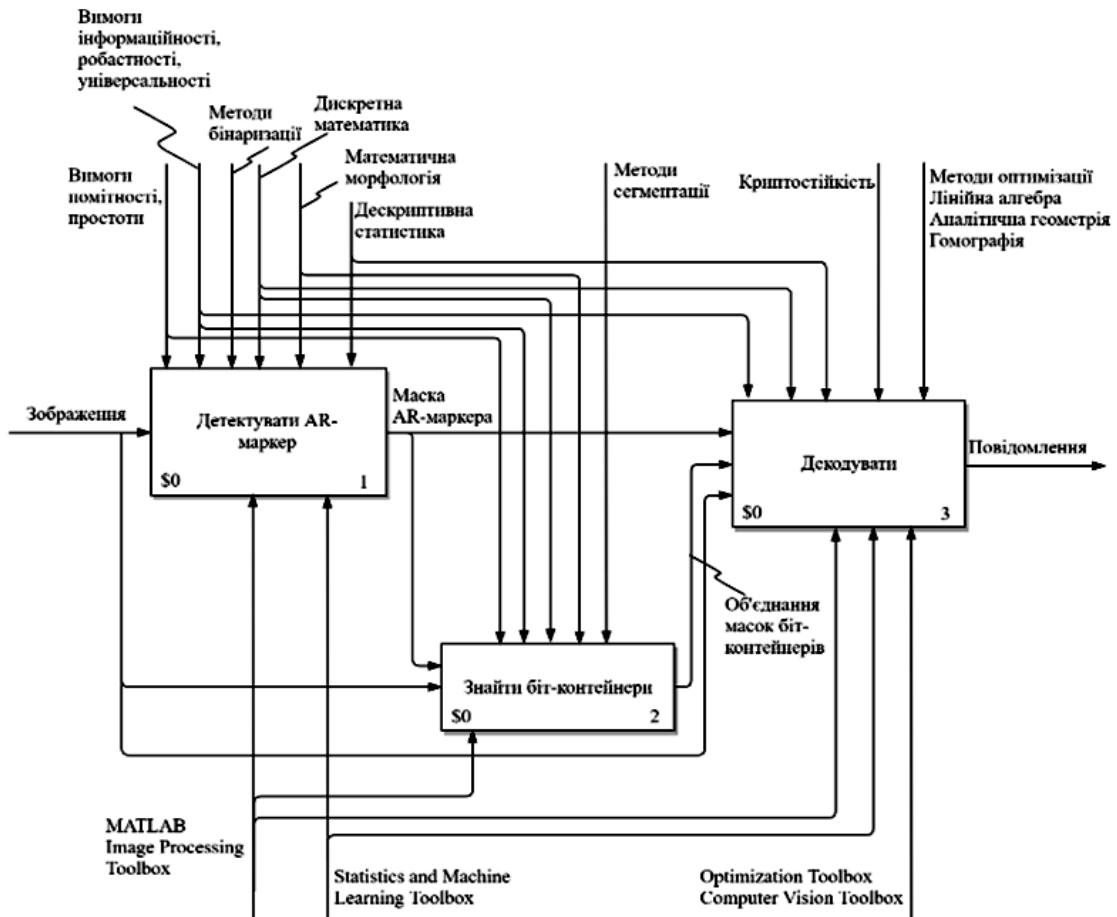


Рис. 7. Декомпозиція підпроцесу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

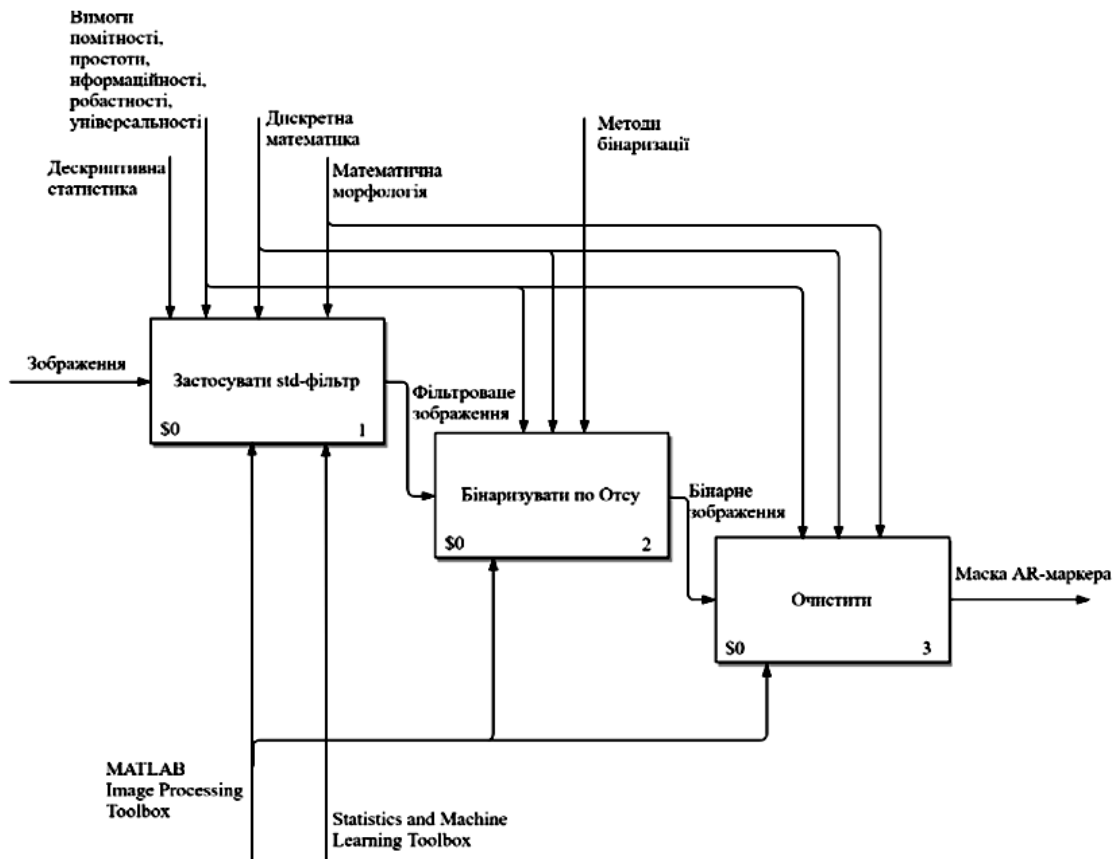


Рис. 8. Декомпозиція підпроцесу детектування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

1) застосувати std-фільтр:  
 – вхід – зображення мозаїчного AR-маркера;  
 – вихід – відфільтроване зображення;  
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, описативна статистика, математична морфологія;  
 – механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox;

2) бінаризувати по Отсу:  
 – вхід – відфільтроване зображення;  
 – вихід – бінарне зображення;  
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, методи бінаризації;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

3) очистити зображення від шуму:  
 – вхід – бінарне зображення;  
 – вихід – маска AR-маркера;  
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, методи математичної морфології;  
 – механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox.

Декомпозиція підпроцесу знаходження біт-контейнерів мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності поділяється на два підпроцеси четвертого рівня (рис. 9):

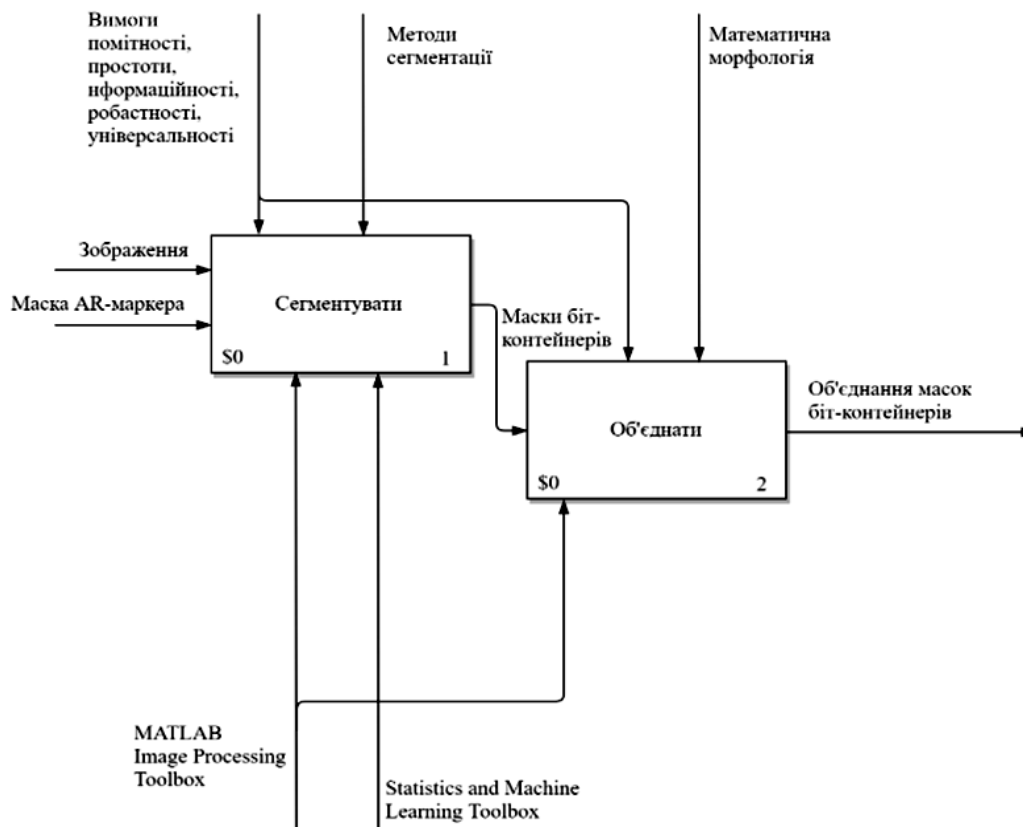


Рис. 9. Декомпозиція підпроцесу знаходження біт-контейнерів мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

1) сегментувати зображення:  
 – вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера, маска AR-маркера;  
 – вихід – маски біт-контейнерів;  
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи сегментації;  
 – механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox;

2) об'єднати маски:  
 – вхід – маски біт-контейнерів;  
 – вихід – об'єднання масок біт-контейнерів;  
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи математичної морфології;  
 – механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox.

Декомпозиція підпроцесу декодування повідомлення мозаїчного стохастичного маркера доповне-

ної реальності поділяється на дев'ять підпроцесів четвертого рівня (рис. 10):

1) знайти параметри проєктивного перетворення:  
 – вхід – об'єднання масок біт-контейнерів;  
 – вихід – матриця гомографії;  
 – управління – вимоги робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія;  
 – механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

2) застосувати проєктивне перетворення:  
 – вхід – зображення AR-маркера, маски біт-контейнерів, об'єднання масок біт-контейнерів, матриця гомографії;  
 – вихід – перетворене зображення AR-маркера; перетворені маски біт-контейнерів, перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;





Рис. 10. Декомпозиція підпроцесу декодування повідомлення мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

– управління – вимоги робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

3) порахувати середні:

– вхід – перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;

– вихід – середні по рядках/стовпцях;

– управління – вимога універсальності; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

4) порахувати пороги:

– вхід – перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;

– вихід – пороги;

– управління – вимога універсальності; методи дискретної математики, методи математичної морфології;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

5) порахувати кількість перетинів:

– вхід – середні по рядках/стовпцях, пороги;

– вихід – кількість стовпців/рядків;

– управління – вимога універсальності, робастності; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

6) побудувати матрицю бітів:

– вхід – перетворене зображення, перетворені маски біт-контейнерів, кількість стовпців/рядків;

– вихід – матриця бітів;

– управління – вимога універсальності, робастності; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

7) знайти зсув:

– вхід – матриця бітів;

– вихід – повна матриця бітів;

– управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики, методи оптимізації;

– механізми – MATLAB; Optimization Toolbox;

8) застосувати інверсну перестановку:

– вхід – повна матриця бітів;

– вихід – зашумлене повідомлення;

– управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

9) знайти моду:

– вхід – зашумлене повідомлення;

– вихід – повідомлення;

– управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики, декриптивна статистика;

– механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox.

Таким чином, вперше отримано науково-прикладні основи побудови маркерів доповненої реальності, що базуються на системі моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах несприятливих зовнішніх впливів.

### Висновки і напрямки подальших досліджень

Встановлено, що на даний час найбільш перспективним є використання маркерних технологій доповненої реальності і визначено переваги і недоліки основних типів AR-маркерів. Сформульовано основні вимоги до AR-маркер

Вперше отримано науково-прикладні основи побудови маркерів доповненої реальності, що базуються на системі моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах несприятливих зовнішніх впливів.

Напрямами подальших досліджень є:

1) розробка методу формування стійкого маркеру доповненої реальності;

2) розробка методу виявлення стійкого мозаїчного стохастичного маркеру доповненої реальності;

3) розробка методу декодування мозаїчного стохастичного маркеру доповненої реальності;

4) розробка методу проектування віртуальних об'єктів на площину маркеру доповненої реальності;

5) розробка інформаційної технології використання мозаїчних стохастичних маркерів у системах доповненої реальності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Goldman, S. Global Investment Research, 2019 / [Electronic resource] – URL: <https://www.goldmansachs.com/careers/divisions/global-investment-research/>
2. Доповнена реальність або AR-технології // [Електронний ресурс] – URL: <http://thefuture.news/lessons/ua/ar>.
3. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності / О. М. Маковейчук // Сучасні інформаційні системи. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 43–48.
4. Adobe Blog. The 10 VR Trends We'll See in 2018, 2019 [Electronic resource] – URL: <https://theblog.adobe.com/10-vrtrends-well-see-2018/>
5. Facebook Research. AR/VR-Facebook Research. 2019 // [Electronic resource] – URL: <https://research.fb.com/category/augmented-reality-virtual-reality>
6. Siltanen, Theory and applications of marker-based augmented reality / S.Siltanen // Espoo 2012 – 2012. – 198 p.
7. Маковейчук О. М. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок / О. М. Маковейчук, І. В. Рубан, Г. В. Худов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019. – № 4 (56). – С. 72–81.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г. В. Худов,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 30.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.10.2019

### Научно-прикладные основы построения устойчивых маркеров дополненной реальности

А. Н. Маковейчук

**Предметом** изучения в статье являются маркеры дополненной реальности. **Целью** является разработка научно-прикладных основ построения устойчивых маркеров дополненной реальности на основе системы моделей и методов устойчивого формирования, обнаружения и декодирования данных, что обеспечивает восстановление изображения в условиях внешних воздействий. **Задачи:** анализ достоинств и недостатков существующих маркеров дополненной реальности, формулировка основных требований к маркеру дополненной реальности, исследование системы моделей и методов устойчивого формирования, обнаружения и декодирования данных, что обеспечивает восстановление изображения в условиях внешних воздействий. Используемыми **методами** являются: методы цифровой обработки изображений, теории вероятности, математической статистики, криптографии и защиты информации, математический аппарат теории матриц. Получены следующие **результаты**. Определены достоинства и недостатки основных существующих типов маркеров дополненной реальности. Сформулировано пять требований, которым должны удовлетворять маркеры дополненной реальности. Предложена система моделей и методов устойчивого формирования, обнаружения и декодирования данных, что обеспечивает восстановление изображения в условиях внешних воздействий. **Выводы.** Направлениями дальнейших исследований является разработка метода формирования устойчивого маркера дополненной реальности; разработка метода выявления устойчивого мозаичного стохастического маркера дополненной реальности; разработка метода декодирования мозаичного стохастического маркера дополненной реальности; разработка метода проектирования виртуальных объектов на плоскость маркера дополненной реальности; разработка информационной технологии использования мозаичных стохастических маркеров в системах дополненной реальности.

**Ключевые слова:** маркер, код, дополненная реальность, виртуальная реальность, модели, методы, требования, робастность, выявление, декодирование.

### Scientific and applied fundamentals of building sustainable augmented reality markers

O. Makoveychuk

The **subject matter** of the article is augmented reality markers. The **goal** is the development of scientific and applied foundations for the construction of stable augmented reality markers based on a system of models and methods for the stable formation, detection and decoding of data, which ensures image restoration under external influences. The **tasks** are: analysis of the advantages and disadvantages of the existing augmented reality markers, the formulation of the basic requirements for the augmented reality marker, the study of a system of models and methods for the stable formation, detection and decoding of data, which ensures image restoration under external influences. The **methods** used are: methods of digital image processing, probability theory, mathematical statistics, cryptography and information protection, the mathematical apparatus of matrix theory. The following **results** are obtained. The advantages and disadvantages of the main existing types of markers of augmented reality are determined. Five requirements are formulated that augmented reality markers must satisfy. A system of models and methods for the stable formation, detection and decoding of data is proposed, which ensures image restoration under external influences. **Conclusions.** The directions of further research are the development of a method for the formation of a stable marker of augmented reality; development of a method for identifying a stable mosaic stochastic marker of augmented reality; development of a decoding method for a mosaic stochastic augmented reality marker; development of a method for designing virtual objects on the plane of the augmented reality marker; development of information technology for using mosaic stochastic markers in augmented reality systems.

**Keywords:** marker, code, augmented reality, virtual reality, models, methods, requirements, robustness, identification, decoding.

Є. В. Мелешко, В. Д. Хох, О. С. Улічев

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ АТАК НА РЕКОМЕНДАЦІЙНІ СИСТЕМИ З КОЛАБОРАТИВНОЮ ФІЛЬТРАЦІЄЮ

**Об'єктом** вивчення у статті є процес забезпечення інформаційної безпеки рекомендаційних систем. **Метою** є дослідження відомих моделей атак на рекомендаційні системи з колаборативною фільтрацією. **Завдання:** дослідити основні особливості відомих атак на рекомендаційні системи, а також методи виявлення та нейтралізації даних атак. Отримані такі **результати:** проведено дослідження основних моделей атак на рекомендаційні системи з колаборативною фільтрацією, їх впливу на результати роботи рекомендаційних систем, а також характерних особливостей даних атак, що можуть дозволити їх виявляти. **Висновки.** Проведене дослідження показало, що основним видом атак на рекомендаційні системи є атака ін'єкцією профілів. Даний вид атак може бути реалізований випадковою атакою, середньою атакою, атакою приєднання до більшості, популярною атакою, тощо. Дані атаки можуть використовуватися як для підвищення рейтингу цільового об'єкта, так і для пониження його рейтингу. Але існують спеціалізовані моделі атак, що ефективно працюють для пониження рейтингу, наприклад, атака любов/ненависть та атака обернена приєднанню до більшості. Усі ці атаки відрізняються одна від одної кількістю інформації, яку необхідно зібрати зловмиснику про систему. Чим більше у нього інформації, тим легше йому створити профілі ботів, які системі буде складно відрізнити від справжніх та нейтралізувати, але тим дорожче і довше підготовка до атаки. Для збору інформації про рекомендаційну систему та її базу даних може використовуватися атака зондом. Для захисту рекомендаційних систем від атак ін'єкцією профілів необхідно виявляти профілі ботів та не враховувати їх оцінки для формування списків рекомендацій. Виявити профілі ботів можна досліджуючи статистичні дані профілів користувачів рекомендаційної системи. Було розглянуто показники, які дозволяють виявляти профілі ботів та розпізнавати деякі типи атак.

**Ключові слова:** рекомендаційні системи, інформаційні атаки, інформаційна безпека, Інтернет-боти, накручування рейтингів, колаборативна фільтрація

### Вступ

Рекомендаційні системи (РС) на основі колаборативної фільтрації (КФ) вразливі до атак зловмисників, які прагнуть змістити частоту потраплянь певного контенту чи товару у списки рекомендацій певної категорії користувачів, для чого вони накручують рейтинги деяким об'єктам системи [1, 2]. При використанні КФ розробники роблять припущення [1] – що користувачі використовують систему лише для одержання якісних рекомендацій для себе, а їх оцінки та коментарі, засновані на особистій думці та покращують рекомендації інших користувачів (напр., рейтинги продавців на сайті оголошень, дозволяють користувачам обирати чесних продавців та оминати шахраїв). Але, нажаль, у окремих користувачів системи можуть бути й інші цілі – відмінні від цілей власників веб-ресурсу та основної частини користувачів системи [2, 3]. Користувачі можуть прагнути підвищувати чи понижувати рейтинги певних об'єктів системи для просування своїх комерційних, політичних чи інших інтересів.

Основним типом атак на рекомендаційні системи з КФ для накручування рейтингів є атаки ін'єкцією профілів [1, 2, 4-10], які полягають у створенні групи профілів ботів для виконання узгоджених дій по зміщенню рейтингів об'єктів у системі. Оскільки результати роботи алгоритмів КФ залежать від дій користувачів системи, можна створювати подробиці профілі, або платити справжнім користувачам за виконання дій, що будуть впливати потрібним зловмиснику чином на результати роботи системи. Для атак ін'єкцією профілів завжди буде цільовий об'єкт та об'єкти для наповнення профілю бота [1, 5]. Рейтинг цільового об'єкта зловмиснику треба збільшити,

або зменшити, а нецільові об'єкти, будуть оцінюватися для наповнення профілю бота та намагання зробити його схожим на профіль справжніх користувачів атакованої системи. Зловмисник для здійснення впливу повинен досить точно імітувати дії звичайних користувачів, щоб не бути виявленим. А робастна до атак РС повинна працювати так, щоб результат від дій зловмисників був настільки малоефективним, щоб у них не було стимулів продовжувати атаки, а справжні користувачі продовжували одержувати релевантні невикривлені рекомендації.

**Метою роботи** є дослідження відомих моделей атак на рекомендаційні системи з КФ та виділення ознак, за якими їх можна ідентифікувати.

### Загальні принципи атак на рекомендаційні системи ін'єкцією профілів

Атакою на РС будемо вважати узгоджені зусилля великої кількості профілів щодо зміщення результатів її роботи таким чином, щоб деяка група користувачів або усі користувачі почали отримувати рекомендації, що суперечать їх потребам.

З точки зору зловмисника, найкраща атака проти рекомендаційної системи – це найбільший вплив на рейтинги за найменшу кількість зусиль з його боку. При атаці на рекомендаційну систему треба здійснювати два види зусиль:

1. Зусилля, пов'язані зі створенням профілів ботів. Реєстрація на веб-ресурсі деякої кількості профілів, навіть в автоматичному, може вимагати часу. Атаки, які потребують меншої кількості профілів, будуть більш привабливі для зловмисників.

2. Зусилля, пов'язані з наповненням профілів оцінками. Тут важливим є кількість знань зловмисника про систему. Чим більше знань у зловмисника

про розподіл оцінок у системі, тим більш реалістичними будуть виглядати профілі ботів, які він створить. Зловмиснику для атаки на РС з мінімальними витратами часу та коштів необхідно визначити мінімальну кількість профілів та оцінок, які йому треба додати до системи, щоб атака була ефективною. Принцип атак ін'єкцією профілів на рекомендаційну систему з КФ зображено на рис. 1.

		ОБ'ЄКТИ					
		a	b	c	d	e	f
Користувачі	1	+	+	+	-	-	-
	2	+	-	+	-	+	-
	3	+	-	+	+	+	-
	4	-	+	-	+	+	+
	5	+	-	+	-	-	?
	6	+	-	+	+	-	?
	7	+	+	+	-	-	+
	8	-	-	+	-	-	+
	9	+	-	+	-	-	+

Звичайні користувачі (rows 1-4)  
Користувачі, на яких спрямована атака (rows 5-6)  
Боти, що атакують систему (rows 7-9)

Рис. 1. Принцип атак ін'єкцією профілів на рекомендаційні системи з колаборативною фільтрацією

На рис. 1 зображено приклад частини бази даних рейтингів рекомендаційної системи, на яку здійснюється атака. Позитивні оцінки об'єктам позначено символом «+», негативні символом «-», а відсутні, які система буде намагатися спрогнозувати – «?». В даному випадку системі треба спрогнозувати оцінки користувачів 5 та 6 для об'єкту f. Якщо система спрогнозує позитивні оцінки, то об'єкт f з великою ймовірністю потрапить у списки рекомендацій даним користувачам. Тому боти виставляють позитивні оцінки об'єкту f, а іншим об'єктам системи виставляють оцінки схожі на ті, які виставили користувачі 5 та 6. З огляду на те, що звичайні користувачі, схожі на користувачів 5 і 6, які оцінювали об'єкт f, ставили йому негативні оцінки, то без дій зловмисників рекомендаційна система спрогнозувала б низьку оцінку даному об'єкту, і він не потрапив би до рекомендацій. Для того, щоб нейтралізувати дану атаку треба визначити, які профілі є ботами, та не враховувати їх оцінки при формуванні списків рекомендацій. Досліджуючи профіль бота, можна розділити всі об'єкти системи на наступні множини (рис. 2):



Рис. 2. Принцип оцінювання ботом об'єктів системи

Як видно з рис. 2, профіль бота містить наступні типи оцінок:

– оцінки об'єктам з множини  $I_{filling}$  для імітації дій справжніх користувачів, оцінки даним об'єктам зловмисник змінювати не прагне, а навпаки намагається підібрати для них значення максимально схожі на справжні для цільової групи користувачів, на яких він прагне впливати;

– оцінка для цільового об'єкту  $i_{target}$ , це буде максимальна (чи близька до неї) оцінка у системі, якщо метою зловмисника є підвищення рейтингу даного об'єкту, або мінімальна (чи близька до неї) оцінка у системі, якщо метою є зниження рейтингу об'єкту.

Для деякої множини об'єктів у системі  $I_{\emptyset}$  оцінок профіль бота не містить. Досліджуючи довжину та склад множини  $I_{\emptyset}$  також можна зробити певні корисні висновки під час перевірки профілю та ідентифікації атаки і її типу.

### Базові моделі атак на рекомендаційні системи ін'єкцією профілів

Розглянемо базові моделі атак на рекомендаційні системи з колаборативною фільтрацією. Найперші моделі атак було запропоновано в [3], – це випадкові та середні моделі атак. Обидві ці моделі атак передбачають генерацію профілів ботів, що будуть випадковим чином виставляти оцінки об'єктам з множини  $I_{filling}$ . В роботах [1, 5, 6, 8-10] розглянуто також більш складні та інформаційно-ємкі атаки.

**1. Випадкова атака** У профілях ботів множина  $I_{filling}$  буде заповнюватися оцінками для об'єктів, вибраних випадковим чином. Оцінки обраним об'єктам будуть підбиратися також випадковим чином, але так, щоб вони були близькі до глобальної середньої оцінки у системі, напр., буде використовуватися нормальний розподіл з математичним сподіванням рівним глобальній середній оцінці. Цільовому об'єкту буде ставитися максимальна  $r_{max}$  або мінімальна оцінка  $r_{min}$  в залежності від цілей атаки. Знання та зусилля, необхідні для здійснення такої атаки, є досить мінімальними – глобальну середню оцінку у багатьох системах можна легко дізнатися на пряму або за допомогою опосередкованих даних. Ця атака не є особливо ефективною.

**2. Середня атака** Використовує індивідуальні середні значення оцінок кожного об'єкту для створення множини  $I_{filling}$ . Інформації для даної атаки треба зібрати більше. Однак середня атака може бути успішною навіть при використанні невеликого набору елементів у  $I_{filling}$ , що дозволяє зменшити кількість необхідної для збору інформації. Але ціною такого зменшення необхідних даних буде велика кількість профілів з однаковими оцінками, що буде, звичайно, легко виявити. Ця атака більш ефективна, ніж випадкова. Але вона практично неефективна для алгоритмів КФ типу item-based. Середня атака вимагає відносно великої кількості знань про статистику дій справжніх користувачів у системі. Розумний захист РС від таких атак буде ускладнювати нападнику збір необхідних даних. Для обходу такого захисту використовуються інші атаки, для яких вимоги до кількості знань значно нижчі.

Розглянемо існуючі атаки, що вимагають менше знань, ніж середня атака, але працюють ефективніше, ніж випадкова атака.

**3. Атака приєднання до більшості** Мета цієї атаки – асоціювати атакований об'єкт з невеликою кількістю об'єктів, які часто оцінюються користувачами (назвемо їх широковідомими). Зловмисник створює профілі ботів, що містять у  $I_{filling}$  оцінки широковідомим об'єктам. Такі профілі мають високу

ймовірність бути схожими на велику кількість користувачів, оскільки широковідомі об'єкти – це ті, які оцінили багато користувачів. Дані для такої атаки одержати досить легко. Отже, серед широковідомих об'єктів випадковим чином обирається декілька. Цим об'єктам ставляться максимальні оцінки разом із цільовим об'єктом. Деякій частині об'єктів у  $I_{filling}$  можуть ставитися випадкові оцінки, напр., як у випадковій атаці для того, щоб урізноманітнити профілі ботів. Досить ефективна атака, але, як і середня, стає неефективною при використанні проти item-based КФ.

**4. Сегментна атака** Основна ідея даної атаки полягає у тому, щоб змінювати рейтинг об'єкту у цільовій групі користувачів з відомими або легко передбачуваними вподобаннями. Тобто цільовому об'єкту рейтинг буде накручуватися тільки у певному сегменті користувачів, щоб він потрапляв у рекомендації тільки ним. Інакше, якщо цільовий об'єкт потрапить у рекомендації користувачам з інших сегментів він може почати отримувати від них низькі оцінки, яких буде більше, ніж накручених оцінок. Щоб здійснити таку атаку треба знайти реальних користувачів, які належать до цільового сегменту та зібрати дані про оцінки, які вони зазвичай виставляють об'єктам системи. Як і в атаці приєднання до більшості, зазвичай визначається, які об'єкти в цільовому сегменті є широковідомими. Цим об'єктам присвоюється максимальне значення оцінки разом із цільовим об'єктом. Щоб забезпечити максимальний ефект від атаки, деякі об'єкти для  $I_{filling}$  обираються випадково та одержують мінімальні оцінки, що дозволяє зробити профілі ботів різними. Дана атака є ефективною проти алгоритмів КФ типу item-based. Слід зазначити, що усі розглянуті вище моделі атак можуть використовуватися для пониження рейтингу об'єкту, але існують спеціалізовані атаки, які працюють краще, ніж інші саме для пониження рейтингу. Розглянемо моделі атак призначені для пониження рейтингу об'єкту.

**5. Атака любов/ненависть** Ця атака дуже проста – без вимог до знань. Цільовому об'єкту присвоюється мінімальна оцінка  $r_{min}$ , а об'єкти для  $I_{filling}$  одержують максимальні оцінки  $r_{max}$ . Незважаючи на надзвичайну простоту, це одна з найефективніших атак на пониження рейтингу проти user-based алгоритмів.

**6. Атака обернена приєднанню до більшості** Це варіант атаки приєднання до більшості, описаний вище, в якому для  $I_{filling}$  вибираються широковідомі об'єкти, яким переважна більшість користувачів ставить низькі оцінки. Цим об'єктам у профілях ботів присвоюються низькі оцінки, а також низька оцінка присвоюється цільовому об'єкту. Таким чином, цільовий об'єкт починає асоціюватися з об'єктами, що не подобаються великій кількості користувачів, і це збільшує ймовірність того, що для об'єкта будуть прогнозуватися низькі оцінки і він не буде потрапляти у списки рекомендацій. Хоча ця атака не є настільки ефективною, як середня атака з великою кількістю знань для user-based систем, вона є дуже ефективною атакою на пониження рейтингів проти item-based систем.

Атаки з низьким рівнем знань використовують широковідомі об'єкти для наповнення профіля бота оцінками для них. Таким чином зловмисник може

створити профіль схожий на середньостатистичного користувача, дослідивши оцінки лише широковідомих об'єктів. Якщо зловмисник знає, який саме алгоритм використовує рекомендаційна система, він може зібрати більше інформації для атаки. Таким чином атаки можна класифікувати на: атаки з малою кількістю знань (цей тип атак не потребує детальних знань про розподіли оцінок у системі, він вимагає системно-незалежних знань, які легко можна отримати за допомогою публічних джерел інформації); атаки з великою кількістю знань (зловмиснику потрібно мати якнайбільше знань про алгоритми системи та розподіли оцінок у об'єктів системи).

Прикладом атаки з великою кількістю знань є популярна атака.

**7. Популярна атака** Припустимо, що система використовує стандартний user-based алгоритм КФ, де подібність між користувачами визначається за допомогою кореляції Пірсона. Аналогічним чином, як і в атаці приєднання до більшості,  $I_{filling}$  заповнюється з використанням широковідомих об'єктів системи. Однак це не гарантує високої схожості між профілем бота та справжніми профілями. Тому популярна атака використовує середні значення оцінок та оцінює об'єкти для  $I_{filling}$  ( $r_{min} + 1$ ) або  $r_{min}$ , залежно від того, чи є середня оцінка для об'єкту вищою чи нижчою. Така стратегія призведе до позитивних кореляцій між профілями ботів та автентичними профілями. Для визначення широковідомих об'єктів не потрібно багато знань, але для визначення середніх оцінок обраних об'єктів треба зібрати багато інформації. Популярну атаку можна легко налаштувати також для атак на пониження рейтингу. Популярну атаку можна виявляти, якщо порівнювати профілі у системі – профілі ботів будуть сильно схожими.

**8. Атака зондом для збирання інформації** Профілі ботів тим важче розпізнати, чим більш схожі їх оцінки на оцінки справжніх користувачів. Знання про реальні вподобання різних сегментів користувачів можна отримати із самої системи через атаку зондом. Для здійснення цієї атаки зловмисник створює насінневий профіль, а потім використовує його для одержання рекомендацій з системи. Ці рекомендації формуються на основі інформації системи про реальних користувачів, тому використання одержаних рекомендацій дозволить створити профілі ботів більш схожі на справжніх користувачів. Можна здійснювати зондування невеликої частини користувачів, щоб потім вплинути на малу групу, як у сегментній атаці, або великої частини – щоб одержати інформацію, напр., для середньої атаки. Зловмиснику потрібно використовувати лише невелику кількість насінневих профілів для того щоб рекомендаційна система сама надала йому потрібну інформацію у вигляді рекомендацій.

### Способи виявлення профілів ботів у рекомендаційних системах

Для того, щоб здійснити атаку, зловмисник намагається отримати доступну інформацію про систему, зокрема, про розподіл оцінок, але він не може дізнатися всю інформацію. Тому профілі ботів, завжди будуть відрізнятися від справжніх користува-

чів. Для виявлення профілів ботів можна використовувати наступні загальні ознаки [6, 8, 9]:

1. Відхилення оцінок від середньої угоди (RDMA) можна використати для знаходження профіля зловмисника:

$$RDMA_u = \sum_{i=0}^{n_u} |(r_{u,i} - \bar{r}_i) / l_i| / n_u, \quad (1)$$

де  $n_u$  – кількість об'єктів, які оцінив користувач  $u$ ;  $r_u$  – оцінка, яку поставив користувач  $u$  елементу  $i$ ;  $l_i$  – кількість оцінок, виставлених об'єкту  $i$  всіма користувачами;  $\bar{r}_i$  – середнє значення усіх оцінок об'єкту  $i$ .

2. Зважене відхилення від середньої угоди (WDMA), можна використати для знаходження профілів користувачів, що вносять значний вплив на зміну рейтингів деяких об'єктів:

$$WDMA_u = \sum_{i=0}^{n_u} |(r_{u,i} - \bar{r}_i) / l_i^2| / n_u. \quad (2)$$

3. Ступінь подібності з топ-сусідами (DegSim), дозволяє виявляти групи ботів, оскільки профіль бота буде сильніше схожий на профілі найбільш схожих на нього користувачів, ніж це відбувається з профілями справжніх користувачів:

$$DegSim_u = \sum_{v=1}^k sim_{u,v} / k, \quad (3)$$

де  $sim_{u,v}$  – коефіцієнт подоби між користувачами  $u, v$ .

4. Відхилення у кількості оцінок. У системі, що має дуже велику базу даних об'єктів, справжні користувачі навряд чи будуть оцінювати великий процент об'єктів системи, оскільки це довго та недоцільно на практиці. А профілі ботів можуть виставляти значно більше оцінок, оскільки вони роблять це автоматично. Тому можна спробувати визначити профілі ботів за допомогою відхилення кількості оцінок в певному профілі від середньої кількості оцінок в профілях користувачів у базі даних системи. Цей показник можна обчислити за формулою:

$$QD_u = |n_u - \bar{n}| / \sum_{k \in U} (n_k - \bar{n})^2, \quad (4)$$

де  $\bar{n}$  – середня кількість оцінок у профілях користувачів системи;  $n_u$  – те ж саме для користувача  $u$ .

Можна також врахувати, що кожна модель атаки має свої специфічні та характерні особливості.

Показники, що можуть допомогти виявити деякі з моделей атак [6, 9, 10]:

1. Середнє відхилення значень оцінок (MeanVar) використовується для виявлення середніх атак на підвищення чи пониження рейтингу та визначення цільових об'єктів зловмисника:

$$MeanVar = \sum_{i \in P_t} (r_{i,u} - \bar{r}_i)^2 / n_u, \quad (5)$$

де  $P_t$  – множина об'єктів, серед яких гіпотетично є цільові;  $r_{i,u}$  – оцінка користувача  $u$  об'єкту  $i$ ;  $\bar{r}_i$  – середня оцінка об'єкту  $i$  серед усіх користувачів;  $n_u$  – кількість оцінок у профілі користувача  $u$ .

Необхідно обчислювати *MeanVar* для кожного можливого  $p_t$  у профілі користувача  $u$ , де  $p_t$  вибирається з об'єктів, які отримують оцінку  $r_t$  (максимальну – для атаки підвищення рейтингу або мініма-

льну – для атаки пониження рейтингу).

2. Різниця між середніми значеннями оцінок гіпотетичних цільових об'єктів та об'єктів для наповнення профілю (FMTD). Цей показник використовується для виявлення атаки приєднання до більшості, атаки зворотної приєднання до більшості, сегментної атаки. У множину  $P_t$  потрапляють всі об'єкти, яким користувач  $u$  поставив цільову оцінку  $r_t$ . У множину  $P_f$  потрапляють усі інші об'єкти, оцінені користувачем  $u$ .

$$FMTD_u = \left| \sum_{i \in P_t} r_{u,i} / n_t - \sum_{k \in P_f} r_{u,k} / n_f \right|, \quad (6)$$

де  $P_t$  – множина об'єктів у профілі користувача  $u$ , які мають цільові оцінки від нього;  $P_f$  – усі інші об'єкти у профілі користувача  $u$ ;  $n_u$  – кількість цільових оцінок у профілі користувача  $u$ ;  $n_f$  – кількість всіх інших оцінок.

Методи захисту від атак на РС поділяються на методи підвищення надійності самих рекомендаційних систем використанням більш робастних до атак алгоритмів (зокрема, надання переваги алгоритмам заснованим на моделях, замість алгоритмів заснованих на пам'яті, додаванні коефіцієнтів довіри у систему для оцінки користувачів), а також створенням системи детектування та нейтралізації профілів ботів у РС.

## Висновки

Проведене дослідження показало, що основним видом атак на рекомендаційні системи є атаки ін'єкцією профілів. Даний вид атак може бути реалізований випадковою атакою, середньою атакою, атакою приєднання до більшості, популярною атакою, тощо. Дані атаки можуть використовуватися як для підвищення рейтингу цільового об'єкта, так і для пониження його рейтингу. Але існують спеціалізовані моделі атак, що ефективно працюють для пониження рейтингу. Усі ці атаки відрізняються одна від одної кількістю інформації, яку необхідно зібрати зловмиснику про систему. Чим більше у нього інформації, тим легше йому створити профілі ботів, які системі буде складно відрізнити від справжніх та нейтралізувати, але тим дорожче і довше підготовка до атаки. Для збору інформації про рекомендаційну систему та її базу даних може використовуватися атака зондом.

Для захисту рекомендаційних систем від атак ін'єкцією профілів необхідно виявляти профілі ботів та не враховувати їх оцінки для формування списків рекомендацій. Виявлення ботів можна здійснювати на основі аналізу статистичних даних користувачів системи – профілі ботів та звичайних користувачів будуть відрізнятися, що можна виявити за допомогою ряду розглянутих метрик. Також кожна з досліджених атак має свої характерні особливості, при виявленні яких можна ідентифікувати профілі як зловмисні.

Також для створення надійних рекомендаційних систем слід враховувати, що різні алгоритми колаборативної фільтрації мають різну робастність до атак ін'єкцією профілів, зокрема, *item-based* алгоритми надійніші, ніж *user-based* алгоритми, а алгоритми засновані на моделях надійніші, ніж алгоритми засновані на пам'яті.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Recommender Systems Handbook / Editors Francesco Ricci, Lior Rokach, Bracha Shapira, Paul B. Kantor. – 1st edition. – New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc. – 2010. – 842 с.
2. Lam S.K., Riedl J. Shilling recommender systems for fun and profit // In Proceedings of the 13th International World Wide Web Conference. – 2004. – pp. 393–402.
3. Улічев О.С., Мелешко Є.В. Програмне моделювання поширення інформаційно-психологічних впливів у віртуальних соціальних мережах // Сучасні інформаційні системи. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 35-39.
4. O'Mahony M.P., Hurley N.J., Silvestre G.C.M. Promoting recommendations: An attack on collaborative filtering // from book Database and Expert Systems Applications: 13th Int. Conf., DEXA Aix-en-Provence, France. – 2002. – pp. 494-503.
5. A. Williams C., Mobasher B., Burke R. Defending recommender systems: detection of profile injection attacks // Service Oriented Computing and Applications. – 2007. – pp. 157–170.
6. Chirita P.A., Nejdl W., Zamfir C. Preventing shilling attacks in online recommender systems // In Proceedings of the ACM Workshop on Web Information and Data Management. – 2005. – pp. 67–74.
7. Zhou W., Wen J., Qu Q., Zeng J., Cheng T. Shilling attack detection for recommender systems based on credibility of group users and rating time series // PLoS ONE 13(5): e0196533. – 2018. – DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196533>
8. Kumari T., Punam B. A Comprehensive Study of Shilling Attacks in Recommender Systems // IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Volume 14, Issue 4. – 2017. – URL: <https://www.ijcsi.org/papers/IJCSI-14-4-44-50.pdf>
9. Mobasher B., Burke R., Bhaumik R., Williams C. Toward trustworthy recommender systems: An analysis of attack models and algorithm robustness // ACM Transactions on Internet Technology, Vol. 7(4). – 2007. – 41 p.
10. Mobasher B., Burke R., Bhaumik R., Williams C. Effective attack models for shilling item-based collaborative filtering system // In Proceedings of the WebKDD Workshop. – 2005. – 8 p.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
 Національний технічний університет «ХПІ», Харків  
 Received (Надійшла) 10.07.2019  
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.09.2019

### Исследование известных моделей атак на рекомендательные системы с коллаборативной фильтрацией

Е. В. Мелешко, В. Д. Хох, А. С. Уличев

**Объектом** изучения в статье является процесс обеспечения информационной безопасности рекомендательных систем. **Целью** является исследование известных моделей атак на рекомендательные системы с коллаборативной фильтрацией. **Задачи:** исследовать основные особенности известных атак на рекомендательные системы, а также методы выявления и нейтрализации данных атак. Получены следующие **результаты:** проведено исследование основных моделей атак на рекомендательные системы с коллаборативной фильтрацией, их влияние на результаты работы рекомендательных систем, а также характерные особенности данных атак, которые могут позволить их выявлять. **Выводы.** Проведенное исследование показало, что основным видом атак на рекомендательные системы является атака инъекцией профилей. Данный вид атак может быть реализован случайной атакой, средней атакой, атакой присоединения к большинству, популярной атакой, и др. Данные атаки могут использоваться как для повышения рейтинга целевого объекта, так и для понижения его рейтинга. Но существуют специализированные модели атак, которые эффективно работают для понижения рейтинга, например, атака любви/ненависти и атака обратная присоединению к большинству. Все эти атаки отличаются друг от друга количеством информации, которую необходимо собрать злоумышленнику о системе. Чем больше у него информации, тем легче ему создать профили ботов, которые системе будет сложно отличить от настоящих и нейтрализовать, но тем дороже и дольше подготовка к атаке. Для сбора информации о рекомендательной системе и ее базе данных может использоваться атака зондом. Для защиты рекомендательных систем от атак инъекцией профилей необходимо выявлять профили ботов и не учитывать их оценки для формирования списков рекомендаций. Выявить профили ботов можно, исследуя статистические данные профилей пользователей рекомендательной системы. Были рассмотрены показатели, позволяющие выявлять профили ботов и распознавать некоторые типы атак.

**Ключевые слова:** рекомендательные системы, информационные атаки, информационная безопасность, Интернет-боты, накручивания рейтингов, коллаборативных фильтрация.

### The research to known attack models for recommendation systems with collaborative filtering

Ye. Meleshko, V. Khokh, O. Ulichev

The **subject matter** of the article is the process of procuring information security of recommendation systems. The **goal** is to investigate known attack models for recommendation systems with collaborative filtering. The **tasks** to be solved are: to study the main features of known attacks on recommendation systems, as well as methods for identifying and neutralizing these attacks. The following **results** were obtained: The researches to the main attack models on recommendation systems with collaborative filtering, their impact on the work results of the recommendation systems, as well as the characteristic features of these attacks that can allow them to be detected were conducted. **Conclusions.** The study found that the main type of attack on recommendation systems is the profile-injection attack. This type of attack can be implemented by the random attack, the average attack, the bandwagon attack, the popular attack, etc. These attacks can be used to increase the rating of a target object or to decrease its rating. However, there are specialized attack models that work effectively to decrease ratings, for example, a love/hate attack and reverse bandwagon attack. All these attacks differ from each other in the amount of information that an attacker needs to collect about the system. The more information he has, the easier it is for him to create bot profiles, which for a system will be difficult to distinguish from real ones and neutralize, but the more expensive and longer the preparation for an attack. The probe attack can be used to collect information about the recommendation system and its database. To protect recommendation systems from the profile-injection attacks, it is necessary to identify bot profiles and not take into account their ratings for the formation of recommendation lists. Identify bot profiles can be examining the statistics of user-profiles of the recommendation system. The study metrics that allow identifying bot profiles and recognizing some types of attacks was conducted.

**Keywords:** recommendation systems, information attacks, information security, Internet bots, shilling attacks, collaborative filtering.

O. Milov<sup>1</sup>, S. Milevskyi<sup>1</sup>, S. Pohasii<sup>1</sup>, K. Rzayev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> Azerbaijan State Oil Academy, Baku, Azerbaijan

## PROCEDURAL BASIS OF CYBERSECURITY SYSTEMS

**The subject** of the research is a system of procedures implemented within the framework of a cybersecurity system, which is analyzed and described in a formal form. **The aim** of this work is to develop a formal description of the system of procedures implemented within the security system, which would automate the analysis, adaptation and design of the entire complex of processes operating within the cybersecurity system. The technique is based on the use of set theory, as well as system and process analysis. **The tasks** that need to be solved are to analyze existing approaches to the analysis of ongoing processes to identify their advantages and disadvantages. Based on the analysis, to propose a new formal presentation and classification of security system processes. The following results were obtained: the general characteristics of the security system processes were identified, the information and model bases of the security system were formed, which made it possible to present an approach to the classification and formal presentation of procedures implemented in security systems.

**Conclusion:** The approach to the classification and the formal description of the procedures implemented in the security system presented in the article allows us to formalize the approach to the analysis and subsequent synthesis of the necessary procedural basis for the design and reengineering of security systems, in a more understandable way to the decision-maker. Thus, the efficiency of managing the mechanisms for protecting the contour of business processes is increased.

**Keywords:** cybersecurity systems, decision maker, semiotic approach, cyberattack, decision making.

### Introduction

Operational interaction of a decision maker (DM) with computer processing tools, presenting information and supporting the selection and application of tools to counter cyber attacks constitute one of the main operations of the entire technological cycle to ensure cybersecurity of business processes. At the same time, the characteristics of a person as an element of a contour are increasingly becoming a «bottleneck» in operational counteraction given the existing structure of means and methods of man-machine interaction.

A way out of this situation is the creation of a cybersecurity system structure that allows:

- collection and integration of information about potential threats and sources of their implementation;
- processing and storage of this information with acceptable degrees of aggregation;
- automatic and (or) man-machine assessment of the state of the level of protection and the environment of functioning of business processes with prediction of the emergence of new types of threats;
- automatic and (or) man-machine search for solutions on the choice of countermeasures, initiated by assessments of the state of the protected object and its environment, as well as unfavorable forecasts of development trends of cyberthreats;
- automatic and (or) man-machine optimization in terms of money spent and time for found and recommended solutions;
- human-machine decision-making with challenge capabilities for analyzing both the data underlying the search for proposed solutions to counter cyberattacks, and the logic and mathematical methods used, on which the search for proposed solutions was based.

The semiotic approach explores the pattern in which the control body knows:

- not always a certain set of parameters  $\{x\}$ , characterizing the current state of the object of protection and the environment of opposition;

- many ways to split  $\{x\}$  on classes of states  $K=\{k_1, k_2, \dots, k_z\}$ , requiring decisions;
- the set models of finding solutions  $\{M\}$ ;
- the set mechanisms for finding solutions on models –  $\{\varphi\}$ .

When implementing such a scheme, dynamically formed sets  $\{k\}$  and  $\{M\}$ , of the possibility of obtaining the necessary solutions in a reasonable time, but the nature of the solutions obtained is qualitative.

Methods of the theory of identification and planning of an experiment can be applied only to the extent that statistics can be collected on the reactions of the object of defense to attacks in the mode of its operation. This makes it difficult to use them directly in the systems under consideration.

Considering the many functions entrusted to the system, the existing approaches to automating decision-making processes, and the presence of decision-makers united in teams, the cybersecurity system for ensuring the contour of business processes should be based on the concept of human-machine control.

### Features of building cyber security systems

Currently, there is no complete general theory of cybersecurity systems, and therefore there is no general model of such systems that have knowledge of cybersecurity and can use cybersecurity systems to organize purposeful behavior of the system while ensuring specified quality criteria [1].

At the same time, an analysis of the tasks to be solved in decision-making systems with intelligent mechanisms for automatically finding means to counter cyber threats shows that [2]:

a formal apparatus describing the processes of recognizing situations, developing and making decisions in a rapidly changing situation with elements of uncertainty should be extremely flexible;

the processes of making decisions are based not only on quantitative characteristics, but also on factors that do not always have quantitative measures (psycho-



logical, moral, etc.). Therefore, the preparation of information for decision-making on the means of counteraction should be viewed as a creative act of choice from a set of possible decisions, in which quantitative factors are combined with the heuristic abilities embedded in the computer that forms the decisions, i.e. decisions are formed on the basis of two components of decision-making and development (formal and creative);

Special attention should be paid to the decision-making procedure itself, i.e. it is important to know which components of the cybersecurity process should be controlled by the decision maker, and which components can be executed by the computer;

an important place is occupied by the problem of human and computer communication. This problem has two sides – the satisfaction of information needs on the information available in the system and participation in the procedure for developing and adopting decisions. A natural requirement for the means of presenting information is their informational content and perception to the language of communication – proximity to the language of professional vocabulary and its slang. The form of communication should be interactive;

the problem of learning or adapting the developed system to the emergence of a new class of threats (hybrid, synergistic) requires the development of a special procedure that allows the release of information presented formally (algorithmically) and informally (expertly). Such a procedure should be man-machine in nature and be applicable to a large class of situations;

the problem of designing and generating different versions of software for decision-making systems requires the development of a special human-machine technology for designing within this class of systems.

Taking into account the nature of the activities of the systems of this type, based on the ability to adapt and build targeted behavior, we will distinguish two types of information in the cybersecurity system [3]:

1) information that implements the targeted behavior of the system by organizing the processes of recognition of the type of cyber attack, search and decision-making on countering;

2) information that is elements of processing from the above-mentioned processes.

The first type of information is called *the knowledge of the system about the subject field of management* – models, tasks, algorithms.

The second type of information is called *data on the state of the system, the object and environment of the formation of threats* – the parameters of the system, the object, the environment and the area of definition of these parameters.

Analysis of decision-making processes allowed us to base the concept on the following notions [4]:

*global logical model of knowledge* as a set of tasks, models and methods of their use for organizing the processes of targeted recognition of situations of threats, developing and making decisions on counteraction;

*the area of interpretation of the global logical model of knowledge* as a structured and ordered dynamic set of attributes characterizing the parameters of

the cybersecurity system, the object and the environment of functioning;

*an army of system analysts, experts* who, using means of recognition and communication, can define and describe the elements of a global logical model of knowledge and its area of interpretation in a volume sufficient to solve problems that can be posed in any problem situations.

When developing a concept, the following model characteristics should be taken into account:

*Expertise* – as a basis for shaping the goals of the cybersecurity system, models that are the area of search for solutions, rules for searching and making decisions on cyber defense of the contour of business processes.

*Associativity* – as the basis for automatic accumulation, generalization of information and adaptation of the cybersecurity system to the changing environment of functioning.

*Many alternatives* – as the basis for displaying all possible ways of finding solutions.

*Semiotics* – as the basis for the development of mechanisms for the integration of heterogeneous information about the object of protection and the environment of the formation of cyber-thunderstorms.

*Sociability* – as the basis for the implementation of dialogue means of communication system with decision makers.

*Virtuality* – as a basis for reflecting the globality of information, which is characterized by territorial disunity and multi-level sources of receiving, storing and using information.

*Efficiency* – as the basis for the implementation of the model of ensuring the necessary level of cybersecurity in software and hardware environments.

The resulting model has a number of new properties, for example, it is at the same time a means of solving problems arising before a system, and a methodology for designing and implementing such systems. The team of experts has both formal and informal knowledge of the subject area of management. In addition, each expert performs a specific learning function in the team. This allows him to easily construct and fill a knowledge model, highlight a specific local logical knowledge model and have access to global knowledge and data models.

The presence of experts allows, in addition to the recognition, development and decision-making procedures, to also build:

procedures for identifying consistent knowledge, using dynamically changing expert groups; create expert decision-making models for different classes of problem situations (threats);

simulate any combination of centralized and decentralized decision making; achieve greater generality, which allows for various methods of solving problems. In addition, in such a team, it is possible to formalize the connection between experts and build standard means of communication on this basis. With the help of these tools, various modes of interaction are organized – from the explicit reference of one expert to another to the implicit reference, when the addressee is determined by the function implemented by him.

The presence of a multitude of tasks, models and knowledge of the way they are used in various situations of decision making and development allows us to develop uniform means of describing such information and organizing their use by the system. Linguistic and software support tools are used as such tools: languages of logical knowledge model definition (LKM) and manipulation of elements of a logical knowledge model (KMM). The definition of knowledge involves the introduction of new types of information, such as model, task. Knowledge manipulation is based on planning decision-making processes in the global knowledge model by using, first of all, the goal setting mechanism.

The considered concept is in good agreement with the nature of complex human-machine decision-making systems and allows using the knowledge of experts and programmers:

- 1) generate threat classifiers for the corresponding contour of business processes;
- 2) to build models of recognition of cyber attacks, the classification of the state, targeting, development and adoption of governing decisions on countering cyber attacks;
- 3) to build a functionally complete set of computational algorithms characterizing a specific area of cyber defense;
- 4) "fill" the cybersecurity software system with specific content;
- 5) to design and generate software systems and organize its problem orientation.

Summarizing what has been said, it can be concluded that the considered concept fully meets the problems of human-machine management of complex technological objects, methods and the theory of building large control software packages, cybersecurity systems [5]. The task of the research is the formation and description of a variety of procedures, the implementation of which in the cybersecurity system of the business process contour will allow to realize the properties and features of the effective functioning of the cybersecurity system as a complex human-machine system.

### Decision making procedures in cyber security systems

Ensuring the required level of cybersecurity of the business process contour will be considered as a man-machine activity to determine the state of the protected object, which requires making decisions related to the search and selection by targeted coordination of *behavioral patterns of all participants in cyber conflict* –  $M_1$  and existing at the decision maker –  $M_2$ . Such a model representation is determined by the accumulated knowledge of methods and mechanisms for ensuring cybersecurity, the goals and limitations of each of the parties, objective and subjective preferences on the choice of ways to achieve goals and assess their degree of applicability. The interactivity of human interaction with the system is organized by introducing the concept of a man-machine situation that requires decisions  $S_j$  and defining this notion of a set of attributes. The nature of this activity, on the one hand, is set by man by controlling the processes of setting the task of tracking the progress of its solution.

On the other hand, the system clarifies the correctness of the tasks set, proposes alternative ways of solving them, using the "knowledge and experience" of the search for solutions, reflected in its model. Thus, the person and the system interact as partners, coordinating their methods of solving the tasks of ensuring cybersecurity of the required level. Symbiosis will be optimal only when the work of the system is organized in the "intelligent" human advisor mode, performing the routine functions of automatic recognition of attacks as well as the search for countermeasures based on information obtained both from experts and using system knowledge. This knowledge exists in the system in the form of two types of structured sets {computational and set-theoretic}, {interactive and *expert logical-algebraic and logical-linguistic*} models of cyber-attack recognition and the search for means to counter it. The first type of models is defined on situations for which an algorithm can be found that connects the desired parameters with the given ones, and the search of variants is not very large. The second type of models is used to search for solutions that are highly dependent on situations and where the search is extremely It can be said that computational and set-theoretic models are analogs of computational operations when searching for solutions, and interactive and expert models are analogs of methods of searching for solutions.

The capabilities of each of the interacting parties to a cyber conflict are determined by the completeness of behavior models, decision-making procedures and the model basis for decision-making procedures. At the same time, decision-making and behavior processes are considered semiotic (sign). Used in this sequence of steps (related causal, temporal, spatial and other relationships) finding control solutions for each problem situation is considered as the *logic of finding solutions*.

At each step of interaction between the decision maker and the decision support system of one of the parties, a query is formed in the form of a problem situation and (or) a subset of the model's algebraic operations in accordance with the logic of the search for solutions. The task of the decision-making system is to find the interpretation of these operations in terms of their model, their implementation and in response to the formation of the request.

The formal representation of the model of behavior of the decision maker in the operational decision making is given by the expression

$$M_1 = \langle BT, DM, I \rangle,$$

where

$$BT = \langle L_{BT}, ACS, \Theta \rangle$$

- behavior theory (system knowledge model);

$$DM = \langle x^z, b^z, f^z, p^z \rangle.$$

- information data model describing the system;

$$I = \langle UI_1, CI_2 \rangle.$$

- interpretation of  $BT$  in  $DM$ , here  $L_{BT} = L_{KDL} \cup L_{DDL}$  – a language for describing a behavior model that is a combination of knowledge and data definition languages;  $ACS$  – theory axioms;  $\Theta$  – rules of inference statements in theory;  $x^z, b^z$  – set of variables and state constants;  $f, p^z$  –

a set of function and predicate of state variables;  $UI_1$  – user interpretation of the elements of the system knowledge model, which defines expertly the correspondence rule between the syntaxes structure of the language elements  $L_{BT}$  and their meaning in the field of cybersecurity (semantics of decision makers);  $CI_2$  – machine interpretation of elements, which specifies expertly the algorithm for establishing the correspondence between the semantic structure of language elements  $L_{BT}$  and their truth at every current moment of the search for solutions (pragmatics of the field of cyber security).

Formal model of the behavior of a participant in a cyber conflict, depending on the restrictions imposed on the rules for deriving statements  $\Theta$ , can be described by means of first-order predicate logic, production and algorithmic systems. Indeed, in the predicate logic there are no restrictions on the use of inference rules. Any withdrawal rule fits any statement already deduced if this statement allows its use. In production systems that are also based on the logic of predicates, there are additional conditions on the applicability of a particular inference rule. These conditions may change during the operation of the production system, depending on the receipt of this or that information in the process of withdrawal. In algorithmic systems, the sequence of application of the rules is uniquely determined. As a language for describing control theory, a first-order predicate logic language and an information processing algorithm language are used. The rules of inference of statements in the theory are the rules of inference in the logic of predicates, their modifications in the system of products and algorithmic rules.

The relationship of the model of behavior with problem situations and problems of finding solutions that appear when they appear is taken into account by taking into account the logical sequence of decision makers working stages while ensuring the security of business processes and identifying a variety of decision-making procedures characteristic of decision makers. The specified set of procedures can be represented in the following sequence:

*procedure of situation classification:*

$$P_1 = \langle S, J, K_p, K_s \rangle,$$

where  $S$  – situation defined by some relation on the set of elements  $I$ ;  $J$  – set of expert preferences for the choice of classification rules, given on the set  $\{S \times K_s\}$ ;  $K_p$  – set of classification rules – decision procedure;  $K_s$  – classes of situations set for which there are models for finding solutions;

*procedure of the model classification* allows to define a set of decision-making models, organizing the calculations on which you can find the required solutions to ensure the required level of cybersecurity:

$$P_2 = \langle S, K_s, A_1, M_1 \rangle,$$

where  $A_1$  – a set of alternatives for choosing solution search models whose weights depend on  $S$  and  $K_s$ , can be set by the person in an interactive mode of work with the system;  $M_1$  – a set of models of finding solutions;

*procedure of forming strategies for the goal of finding solutions* allows to define a set of local and / or

global goals of the cybersecurity system that must be achieved with the help of solutions found in this class of situations:

$$P_3 = \langle S, K_s, G, C_r, S_r \rangle,$$

where  $G$  – a set of current targets facing the control system;  $C_r$  – a set of criteria for achieving goals (both goals and criteria can vary and change over time);  $S_r$  – a set of strategies to find solutions;

*procedure for finding target management solutions* allows to organize a search for solutions for each of the problem situations in accordance with the goals and criteria for ensuring the security of the business process loop:

$$P_4 = \langle S, S_r, M_1, R_G \rangle,$$

where  $R_G$  – a set of target control solutions that can be found in the decision search model (knowledge base)  $M_1$ , tuned to the current situation  $s_i \in S$  when using strategy  $str_i \in S_r$ . This procedure performs two functions – a computational sequence finder and a solver scheduler. The first function is to form a crucial program sequence, the second is to organize the execution of these programs and receive management recommendations in a specific computing environment;

*the procedure for determining the possible outcomes of the implementation of solutions* allows to set the reachability of local and (or) global management goals in the implementation of certain solutions to counter cyber attacks. This is done by organizing calculations on a model of an admissible decision area –  $M_{ADA}$ , defining this area –  $O_{ACA}$ , in accordance with the objectives  $G$  and criteria –  $C_r$ , characteristic of this level of decision making. This procedure is set by

$$P_{11} = \langle P_1, P_2, P_3, P_4 \rangle,$$

where  $R_{G1}$  – the set of those governing decisions that are satisfactory outcomes, i.e. outcomes that can achieve local and / or global management objectives.;

*procedure of the decision substantiation* allows assessing the quality of decisions (their optimality) by organizing calculations on a model for determining the optimal decision-making area ( $M_{ODA}$ ) to select the area of optimal control solutions ( $O_{OD}$ ) in accordance with the goals and criteria. Tuple element  $R_{G1}$  is the set of those control solutions that satisfy  $O_{OD}$  and can be primarily recommended for implementation. This procedure

$$P_6 = \langle S, R_{G1}, G, C_r, M_{ODA}, O_{OD}, R_{G2} \rangle -$$

*procedure of the solution synthesis* allows reducing the number of simultaneously recommended solutions for counteraction, regardless of how many situations are simultaneously analyzed by the system. In addition, the procedure ranks decisions issued by the decision maker as according to the information received from the procedures  $P_5, P_6$ , so using the set of preferences for the "narrowing" of the set  $R_G$ . These preferences can be set expertly.

The procedure is given as

$$P_7 = \langle S, R_{G2}, O_{ACD}, O_{ODR}, R \rangle.$$

Information for the decision maker after the operation of this procedure is issued in the form  $\langle \{S\} \Rightarrow \{R, O_{ACD}, O_{ODR}\} \rangle$ .

The decision maker can associate the current situation with the necessary decisions, taking into account their belonging to  $O_{ACD}$  or  $O_{ODR}$ , setting  $R_{G2}$ ;

*procedure of the decision-making* allows to organize the process of man-machine interaction in order to make one decision to be implemented. In this case, the decision maker may choose one of the means of counteraction recommended by the system or accept his own, different from the recommended,  $R_G$ , what he should inform the system. If  $R_G \cap \bar{R} = 0$ , then this solution can be implemented. Here  $\bar{R} = R_G \cap R_{G1} \cap R_{G2}$  – forbidden set of solutions. Formally, this procedure,

$$P_8 = \langle S, R, \bar{R}, R_G, \rangle,$$

*procedure for evaluating the results of the implementation of the decisions* allows to evaluate the effectiveness of the adopted and implemented decisions for the purpose of correcting (in the mode of training or self-study) the model of knowledge of the system and translating part of the information  $\{ \langle \text{situation} \rangle - \langle \text{decision} \rangle \}$  from the sphere of the decision-making system to the sphere of automatic implementation of the decision. This procedure

$$P_9 = \langle S, R \cup R_G, M_1, P_{13} \rangle,$$

where  $P_{13}$  – procedure for learning (self-study) of the system and correction of its knowledge model  $M_1$ ;

*procedure of the solution tracing* makes it possible to organize the tracking of the logic of machine reasoning when searching for solutions and the information basis used for this. This procedure returns the DMP the

observability property, i.e. the possibility of establishing any relationship on the elements of decision-making procedures. The tracing procedure is based on the modification of an ordered sequence  $\varphi_1 - \varphi_9$  – procedures. The modification consists in introducing into each procedure i an assertion about the correctness of obtaining results with its help. Formally, this procedure

$$P_{10} = \langle \mu_1 : P_1, \mu_2 : P_2, \dots, \mu_9 : P_9, C_{or} \rangle,$$

where  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_9$  – conditions of performance (validation statement) of procedures  $P_1, P_2, \dots, P_9$  respectively, recorded as  $\mu_i : P_i$ . With the help of the elements of this tuple, a person can, through interaction with the system, psychologically believe in the correctness of the solutions found. Statements owned by  $Cor$ , determine the consistency of logic embedded in the database of models and procedures of a computer and a decision maker, i.e. they allow the system to inform the decision maker that the next cycle of search and decision-making is completed;

*procedure of the information dialogue* organizes the human-machine interaction of the decision maker with the system in order to obtain the necessary information. This procedure

$$P_{11} = \langle P_1, P_2, P_3, P_4 \rangle,$$

where  $P_1 - P_4$  – considered procedures in which the following substitutions were made:  $S/R_A, M_1/M_A, C/C_D, G/G_D; R/R_0; R_D$  – many requests from the decision maker;  $M_A \in M_1$  – a variety of response search models by query definition areas;  $Str_D$  – a set of strategies aiming for finding solutions ranked by a set  $M_A$ ;  $G_D$  – a set of current goals;  $R_O$  – a set of answers issued by the decision maker when the system responds to a request;

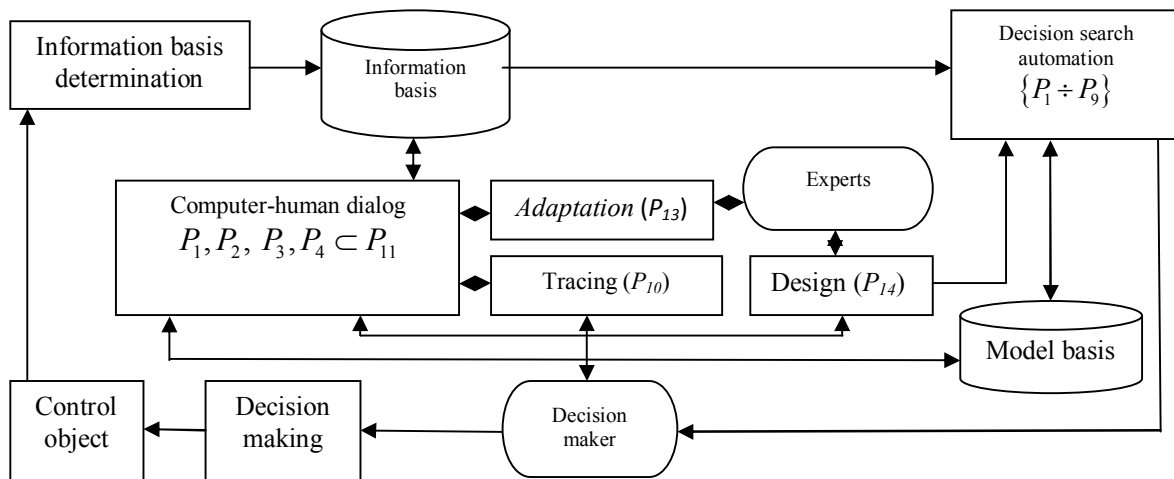


Fig. 1. The logical sequence of cybersecurity system procedures

*procedure for determining the information basis* for making decisions communicates with the information collection system in order to organize the processing of this information and record it in the information model (database) of the systems. Formally, this procedure:

$$P_{12} = \langle S, P_1, P_2, P_3, P_4, M_1, M_D \rangle,$$

where  $M_D$  – information model storing the current state of the object;

*the adaptation / training procedure* allows to organize an automated system setup for the cyber security area.

This procedure

$$P_{14} = \langle S, L_{DKL}, L_{DML}, L_{LDL}, M^{Comp} \rangle,$$

where  $L_L$  – a mechanism for correcting knowledge and data base models (means for describing knowledge and data), which allows to bind information in its machine

representation;  $E_K, E_D$  — set of elements of the model level of knowledge and data;

*procedure of a computer-aided design*, or, alternatively, an interactive cyber-security system computer-aided design system. For decision makers and system analysts, designers is the procedure

$$P_{14} = \langle S, L_{DKL}, L_{DML}, L_{DDL}, M^{Comp} \rangle,$$

where  $S$  — design situation from a class of man-machine design situations, reflecting the subject-oriented formulation of the problem of constructing an information-model basis;  $L_{DKL}, L_{DML}, L_{DDL}$  language

means of describing the elements of the model basis of knowledge and data;  $M^{Comp}$  — machine representation of information model basis.

## Conclusions

The developed and cited procedural basis of cyber-security systems will significantly improve the efficiency of the development and implementation of modern cybersecurity methods. The use of the developed models will significantly formalize the process of creating cybersecurity systems and thus eliminate the subjectivity of the decisions made.

## REFERENCE

1. Гришук Р. В., Даник Ю. Г. Основы кибернетической безопасности : Монография / Р. В. Гришук, Ю. Г. Даник ; за заг. ред. проф. Ю. Г. Даника. – Житомир : ЖНАЕУ, 2016. – 636 с.: іл.
2. Cayirci E., Ghergherechi R. “Modeling cyber attacks and their effects on decision process” Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011.
3. Hryshchuk R. The synergetic approach for providing bank information security: the problem formulation // R. Hryshchuk, S. Yevseiev/ Безпека інформації. – 2016. – № 22 (1). – С. 64–74.
4. Balke T., Gilbert N. “How Do Agents Make Decisions? A Survey”, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, # 17 (4), 2014.
5. Kott, A., Wang, C., Erbacher, R.F.: Cyber Defense and Situational Awareness. Springer (2014).

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
Національний технічний університет “ХПІ”, Харків  
Received (Надійшла) 22.08.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

### Процедурний базис систем кібербезпеки

О. Мілов, С. Мілевський, С. Погасій, Х. Рзаєв

**Предметом** дослідження є система процедур, що реалізується в рамках системи кібербезпеки, яка аналізується і описується в формальному вигляді. **Метою** даної роботи є розробка формального опису системи процедур, що реалізуються в рамках системи безпеки, яке дозволило б автоматизувати процеси аналіз, адаптації та проектування всього комплексу процесів, що функціонують усередині системи кібербезпеки. Методика заснована на використанні теорії множин, а також системного і процесного аналізу. **Завдання**, які необхідно вирішити - проаналізувати існуючі підходи до аналізу реалізованих процесів для виявлення їх переваг та недоліків. На основі проведеного аналізу запропонувати нове формальне подання та класифікацію процесів системи безпеки. Були отримані наступні **результати**: виявлено загальні характеристики процесів системи безпеки, сформовані інформаційний і модельний базиси системи безпеки, що дозволило представити підхід до класифікації і формальному поданням процедур, реалізованих в системах безпеки. **Висновок**: Представлений в статті підхід до класифікації і формальному опису процедур, реалізованих в системі безпеки, дозволяє формалізувати підхід до аналізу і подальшого синтезу необхідного процедурного базису при проектуванні і реінжиніринге систем безпеки, у вигляді більш зрозумілою особі, що приймає рішення. Таким чином збільшується ефективність управління механізмами захисту контуру бізнес-процесів.

**Ключові слова**: система кібербезпеки, особа, яка приймає рішення, семіотичний підхід, кібератака, прийняття рішень.

### Процедурний базис систем кібербезпеки

А. Мілов, С. Милевский, С. Погасий, Х. Рзаев

**Предметом** исследования является система процедур, реализуемая в рамках системы кибербезопасности, которая анализируется и описывается в формальном виде. **Целью** данной работы является разработка формального описания системы процедур, реализуемых в рамках системы безопасности, которое позволило бы автоматизировать процессы анализ, адаптации и проектирования всего комплекса процессов, функционирующих внутри системы кибербезопасности. Методика основана на использовании теории множеств, а также системного и процессного анализа. **Задачи**, которые необходимо решить – проанализировать существующие подходы к анализу реализуемых процессов для выявления их преимуществ и недостатков. На основе проведенного анализа предложить новое формальное представление и классификацию процессов системы безопасности. Были получены следующие **результаты**: выявлены общие характеристики процессов системы безопасности, сформированы информационный и модельный базисы системы безопасности, что позволило представить подход к классификации и формальному представлению процедур, реализуемых в системах безопасности. **Вывод**: Представленный в статье подход к классификации и формальному описанию процедур, реализуемых в системе безопасности, позволяет формализовать подход к анализу и последующему синтезу необходимого процедурного базиса при проектировании и реинжиниринге систем безопасности, в виде более понятного лицу, принимающему решение. Таким образом увеличивается эффективность управления механизмами защиты контура бизнес-процессов.

**Ключевые слова**: система кибербезопасности, лицо, принимающее решение, семиотический подход, кибератака, принятие решений.

В. В. Міхав

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖ РЕПУТАЦІЇ КОРИСТУВАЧІВ СОЦІАЛЬНИХ ВЕБ-РЕСУРСІВ НА ОСНОВІ БІНАРНИХ ДІАГРАМ РІШЕНЬ

**Об'єктом** вивчення у статті є процес моделювання соціальних мереж. **Метою** є розробка програмного забезпечення для моделювання мереж репутації користувачів соціальних веб-ресурсів на основі бінарних діаграм рішень. **Завдання:** дослідити можливість моделювання соціальних мереж на основі бінарних діаграм рішень, розробити метод моделювання мереж репутації користувачів соціальних веб-ресурсів на основі бінарних діаграм рішень, розробити програмне забезпечення для реалізації розробленого методу моделювання мереж репутації користувачів. **Методи досліджень:** теорія графів, теорія моделювання, теорія алгоритмів, об'єктно-орієнтоване програмування. Отримані такі **результати:** розроблено метод накопичення змін у бінарних діаграмах рішень для зменшення кількості їх редагувань; розроблена модель мережі репутації користувачів соціальних веб-ресурсів на основі бінарних діаграм рішень. **Висновки:** Проведено дослідження можливості використання бінарних діаграм рішень для моделювання соціальних мереж. Детально розглянуті основні типи соціальних мереж та методи їх аналізу. Розкрита актуальність розвитку та застосування методології аналізу соціальних мереж, зокрема в сучасних інформаційних технологіях. Проведено огляд моделей аналізу соціальних мереж, з урахуванням того, що соціальні одиниці не діють незалежно, а навпаки, впливають одна на одну. Результати досліджень показали, що бінарні діаграми рішень – це один з найкомпактніших способів представлення структури соціальних мереж, адже структура бінарних діаграм рішень дозволяє створювати відношення між більше ніж двома агентами. Розроблений метод накопичення змін у бінарних діаграмах рішень для зменшення кількості їх редагувань дозволяє зменшити кількість операцій над бінарними діаграмами рішень. Розроблено метод моделювання мереж репутації користувачів соціальних веб-ресурсів. Розроблена програмна модель мережі репутації користувачів соціальних веб-ресурсів на основі бінарних діаграм рішень дозволяє моделювати поширення інформації у соціальних мережах з врахуванням репутації користувачів мережі.

**Ключові слова:** соціальна мережа, мережа репутації, бінарні діаграми рішень, моделювання, розповсюдження інформації.

### Вступ

Соціальна мережа відіграє фундаментальну роль як середовище для поширення інформації, ідей та впливу серед її членів, а структура соціальної мережі – це важливий фактор функціонування економічних та соціальних систем.

Сьогодні застосування аналізу та моделювання соціальних мереж набуло неабиякого поширення. Моделювання соціальних мереж зосереджується на двох основних напрямках: аналіз структури соціальних мереж та дослідження поширення інформації у соціальних мережах [1]. Моделювання дозволяє дослідити, як формуються та розвиваються соціальні мережі, а також допомагає зрозуміти і спрогнозувати поширення інформації, вибір поведінки людьми, поведінку ринку тощо.

Дослідження соціальних мереж має широке застосування у бізнес-аналітиці, маркетингу та розвідці. Аналіз соціальних мереж використовується для прогнозування росту мережі, поведінки та взаємодії користувачів, а також для створення списку рекомендацій та визначення лідерів соціальних об'єднань.

Важливе значення моделювання соціальних мереж також має у комп'ютерних рольових іграх, у яких передбачена можливість спілкування із неігровими персонажами [2]. У цьому випадку моделювання спрямоване на відтворення персонажами, керованими комп'ютером, звичної соціальної поведінки.

У роботах [3-5] розглядається ефективність каскадного поширення інформації у соціальних мережах методом «word-of-mouth» («із вуст у вуста») та

алгоритми визначення ключових осіб (лідерів) мережі. Лідери мережі мають велику кількість зв'язків, завдяки чому мають значний вплив на каскадне поширення інформації у мережі. У двокроковій моделі спочатку формуються думки лідерів мережі, а потім формуються думки інших агентів. У моделях, які враховують схильність агентів до впливу, лідери мають менший вплив, а значні каскади спричиняються поширенням інформації між агентами, що легко піддаються впливу [6].

Із впливом лідерів мережі також пов'язані дослідження методів атаки на соціальної мережі та захисту від втручання. До основних векторів атаки відносять примус лідера мережі до поширення фальсифікованої інформації та вилучення лідера з мережі [7]. Через лідера мережі проходить багато шляхів, тому його вилучення може призвести до розпаду соціальної мережі на непов'язані підструктури. У роботі [8] пропонується алгоритм вибору оптимальної кількості сенсорів (підмножини вузлів мережі) для раннього виявлення потенційно шкідливих каскадів та мінімізації поширення шкідливої інформації до її виявлення.

Серед моделей, які фігурують у дослідженнях останніх років, переважають імітаційні моделі, у тому числі агенто-орієнтовані моделі. У цьому типі моделей визначається поведінка агентів на індивідуальному рівні, а глобальна поведінка моделі визначається на основі діяльності її агентів [9].

Моделювання великих соціальних мереж вимагає збереження інформації про велику кількість об'єктів та зв'язків між ними, тому для їхнього

представлення у пам'яті комп'ютера необхідно використовувати структуру даних, яка дуже економно витрачає пам'ять. Бінарні діаграми рішень дозволяють ефективно представляти булеві функції, у тому числі і зв'язки між вузлами мережі. Тому ми вважаємо, що дані моделі соціальної мережі можна ефективно представити за допомогою бінарних діаграм рішень.

**Метою даної роботи** є розробка програмного забезпечення для моделювання мереж репутації користувачів соціальних веб-ресурсів на основі бінарних діаграм рішень.

### Основна частина

Один з найбільш поширених способів представлення графа  $G = (V, E)$  – це матриця суміжності. Припустимо, що множина вершин  $V = \{1, 2, \dots, n\}$ . Матриця суміжності для незваженого графа  $G$  – це матриця  $A$  розміру  $n \times n$  зі значеннями булевого типу, де  $A[i, j] = \text{true}$  тоді і тільки тоді, коли існує дуга від вузла  $i$ , до вузла  $j$  [2] (рис. 1). На практиці у матрицях суміжності значення true замінюється на 1, а значення false – на 0. Якщо граф зважений, то його також можна представити за допомогою матриці суміжності, але у якій елемент  $A[i, j]$  дорівнює вазі дуги  $i \rightarrow j$ .

Представлення орграфа у вигляді матриці суміжності зручно застосовувати у тих алгоритмах, у яких необхідно часто перевіряти існування даної дуги. Головний недолік цього підходу в тому, що вона потребує  $\Omega(n^2)$  об'єму пам'яті, а для її читання необхідний час порядку  $O(n^2)$ , незалежно від кількості дуг [2, с. 185].

**1. Представлення орієнтованих графів за допомогою бінарних діаграм рішень.** Матриця суміжності  $A$  містить значення булевого типу, тобто вона є матричним представленням булевої функції  $F$ , яка описує наявність дуги між двома вузлами.

У якості параметрів функції  $F$  ми пропонуємо використати номери вузлів у бінарній формі. Тоді функція  $F(i_0, i_1, \dots, i_m, j_0, j_1, \dots, j_m) = \text{true}$ , якщо існує дуга  $0(2^{l+1}) i \rightarrow j$ , де  $n \in N$ ,  $i, j \in [0, n]$ ,  $i_p, j_p$  – значення біту на позиції  $p$ ,  $p \in [0, m]$ .

Якщо орграф  $G$  помічений, то необхідно також зберегти його вагу. Для збереження ваги  $k$  дуги  $i \rightarrow j$  можна використати додаткову групу параметрів  $k_0, k_1, \dots, k_l$ ,  $l = \lceil \log_2(\max k) \rceil$ . У цьому випадку для знаходження ваги дуги необхідний час порядку  $O(2^{l+1})$ .

Представлення булевої функції як таблиці істинності чи досконалої кон'юнктивної\диз'юнктивної нормальної форми потребує  $\Omega(2^{2m+l})$  пам'яті та вимагає значних обчислень для визначення значення функції. Тому для представлення булевої функції ми пропонуємо використати бінарні діаграми рішень.

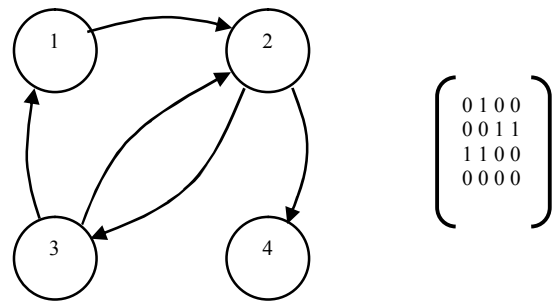


Рис. 1. Орієнтований граф та його матриця суміжності

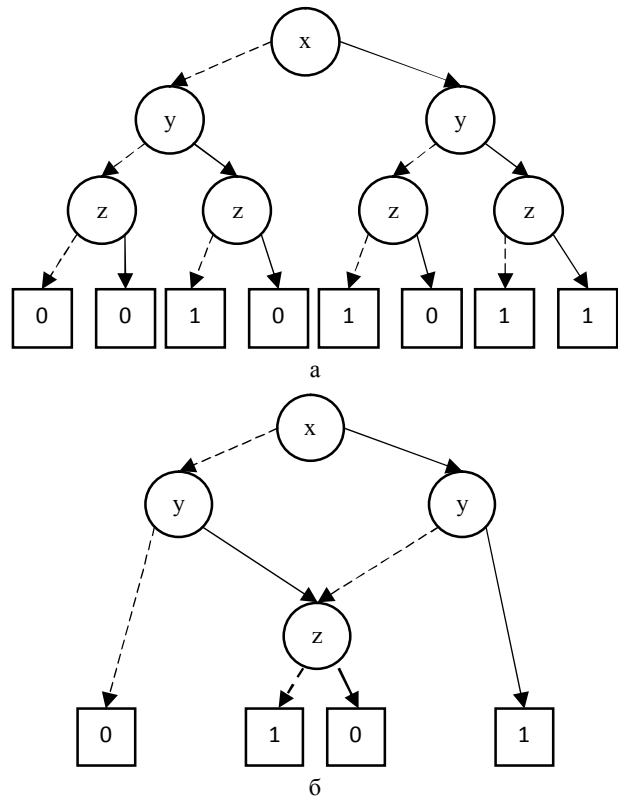


Рис. 2. Перехід від бінарного дерева рішень (а) до бінарної діаграми рішень (б)

**2. Бінарні діаграми рішень.** Бінарні діаграми рішень (БДР, binary decision diagram, BDD) – це економна форма представлення булевих функцій у вигляді орієнтованого ациклічного графа. Вершини графа представляють аргументи функції, листки – її двійкові значення [10]. 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, у тому числі і в комбінаториці. Бінарна діаграма рішень представляє булеву функцію у вигляді мінімального ациклічного направленого графа.

**3. Адаптація БДР для представлення орієнтованих графів.** Для додавання і вилучення ребер та зміни ваги ребер необхідно мати можливість редагувати дані графу. БДР дають можливість зберігати

ти дані у стисненому вигляді та швидко отримувати значення функції за її параметрами, але редагування БДР вимагає складних обчислень.

**4. Накопичення змін до БДР.** Якщо алгоритм передбачає періоди інтенсивного редагування графу, можна тимчасово зберігати зміни у структурі даних, більш пристосованій до внесення змін. Ми пропонуємо 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. Можна розділити коригування на додавання і вилучення значень і створити дві коригувальні БДР: одну для додавання значень з використанням операції АБО та одну для вилучення значень з використанням операції І. Проте цей підхід не оптимальний. Якщо порівняти збережені значення із тимчасовими, то можна визначити, як саме змінилося значення. Тоді у коригуючій БДР для кожного зміненого значення необхідно буде встановити значення 1 та злити її із основною БДР з використанням операції виключне або (*XOR*). Завдяки цьому внесення змін можна організувати за одну операцію злиття. Особливо корисним використанням *XOR* стає, коли ми хочемо зберігати інформацію не лише про факт наявності дуги між вузлами, а й зберігати вагу цієї дуги. Для цього ми пропонуємо виділити додаткову групу змінних, яка відповідатиме за представлення ваг у БДР. Позначимо такі змінні як булевий вектор *s*. Значення 0 ми резервуємо для позначення відсутності дуги. Такий підхід не передбачає збереження дробових чисел, проте можна розробити нумерацію дробових чисел і зберігати не саме число, а його номер. Для того, щоб прочитати значення ваги, під час проходження по БДР необхідно:

- зафіксувати, які змінні з групи *s* трапляються на шляху;
- перевірити, чи створює така змінна альтернативний маршрут: якщо так, то необхідно перевірити обидва маршрути та відкинути хибний.

На основі зафіксованих змінних формується значення ваги. Ми вважаємо, що кожній парі номерів вузлів може відповідати лише одне значення ваги. У загальному випадку ми можемо отримати декілька дійсних маршрутів у БДР і, відповідно, декілька значень. Така ситуація може виникнути, якщо замість номерів двох вузлів у запиті буде вказано номер вузла та значення ваги: у цьому разі ми зможемо отримати номери усіх вузлів, до яких є дуги від вказаного вузла із вказаною вагою. Можливість створення таких запитів вигідно виділяє БДР серед інших способів представлення графів.

Зберігання значень ваг у бінарному вигляді не дає можливості вибирати значення, які більші чи

менші за вказане. Проте, якщо планується використовувати невеликі цілі значення ваг, можна перейти від бінарної до унарної системи числення. Це збільшить кількість змінних у БДР, проте мало вплине на її розмір, оскільки більшість нових змінних будуть присутніми в діаграмі лише раз. Завдяки унарній системі числення можна здійснювати вибірки за умовами  $\geq$  та  $<$ . Окрему змінну можна виділити для зберігання знаку.

Цей підхід дає можливість накопичувати зміни і фіксувати їх за необхідності, завдяки чому зменшує кількість операцій злиття БДР. Проте він вимагає значного ускладнення проекту та додаткових витрат пам'яті для реалізації гарячого сховища.

У розроблюваній системі було виділено 3 основні сутності: агент, повідомлення та тема. Повідомлення має інформацію про відправника, одержувача, учасників події та її оцінки. Повідомлення може бути пов'язане із кількома темами. Агент має інформацію про власні зв'язки та уявлення про відносини інших агентів, а також пов'язаність агентів за темами.

Теми дають можливість поширювати повідомлення не для всіх знайомих агентів, а лише для тих, кому, за думкою автора повідомлення, воно буде цікаве. На основі повідомлень агент може скласти уявлення про відносини між іншими агентами, та використати цю інформацію під час вибору цілей для поширення повідомлень. У зв'язку з цим допускається асиметричність зв'язків: агент А може знати агента Б, але при цьому агент Б може не знати агента А. Наприклад, багато людей знають знаменитість, але знаменитість не знайома із ними. Це може бути корисно для поширення повідомлень про спільних знайомих.

Користувач має доступ до 4 основних дій у моделі: створення агента, задання початкових відносин, визначення відносин агента та ініціювання передачі повідомлення.

Наша реалізація моделі не призначена для самостійної роботи, тому взаємодію з нею користувач повинен здійснювати через іншу програму, яка використовуватиме інтерфейс нашої моделі (рис. 3).

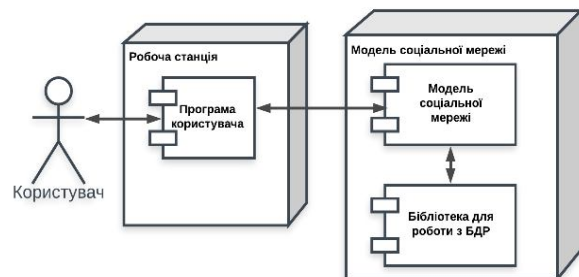


Рис. 3. Діаграма розгортання

Для функціонування моделі необхідно мати можливість визначати відносини між агентами. Для цього потрібно мати можливість визначати, за яких параметрів БДР можна досягти шуканого терміналу. Діаграма діяльності ініціювання пошуку таких параметрів зображена на рис. 4.



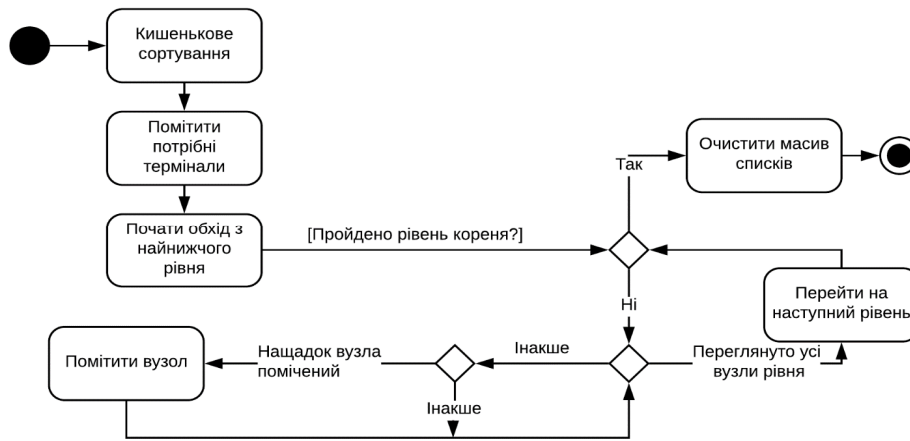


Рис. 4. Діаграма діяльності ініціювання пошуку в БДР

На рис. 5 показано, як взаємодіють користувачка програма та компоненти моделі соціальної мережі під час вибору агентів для поширення повідомлення на один крок. Модель має визначити, з якими агентами поточний агент має достатньо хороші відносини, а також яким агентам може бути цікава тема повідомлення чи його учасники. Оскільки дані про відносини та теми зберігаються у різних діаграмах, то для отримання кінцевого результату необхідно об'єднати отримані дані. При цьому списки зацікавлених у темах повідомлення та його учасниках можна об'єднати, а потім знайти перетин зі списком за рівнем відносин. Наша реалізація моделі соціальної мережі повинна ефективно використовувати ресурси комп'ютера, оскільки моделювання поведінки великої кількості об'єктів вимагає значного об'єму пам'яті. Також, оскільки наша модель має використовуватися як бібліотека, а не самостійний продукт, то вона повинна легко інтегруватися з іншими програмними продуктами. Для реалізації моделі ми обрали мову програмування С. Вибір зумовлений такими причинами:

1. У мові С реалізовано пряме керування пам'яттю. Це дає можливість мінімізувати супутні витрати пам'яті, але також може стати джерелом таких вразливостей, як витік пам'яті чи переповнення буферу [11].

2. Багато мов програмування, такі як Python, С# та NodeJS, можуть використовувати розширення, написані на С.

3. Код, написаний на С, добре переноситься між платформами та операційними системами.

Для реалізації бінарних діаграм рішень необхідно визначити спосіб представлення БДР у пам'яті та реалізувати операції створення та редукування та редагування БДР, пошуку значення БДР за параметрами та оптимізації порядку змінних. Ми опиралися на ідеї, запропоновані Д. Кнутом у роботі [12], а також ввели деякі власні оптимізації.

Питання ефективного використання пам'яті при роботі з БДР стоїть особливо гостро, оскільки вони мають ефективно представляти булеві функції великої розмірності. Наприклад, у роботі [12, с. 276] показано, що не більше  $2^{246} i \rightarrow j$  функцій від 98 змінних мають БДР розміром менше трильйона, тоді як розмір інших має порядок  $O(2^{98})$ . Тому більшість

оптимізацій направлено на економію пам'яті. Приклад роботи програмної моделі зображено на рис. 6.

Для прикладу ми випадковим чином згенеруємо декілька соціальних мереж.

Спочатку ми створюємо нову модель, у якій міститься *agentCount* агентів. Функція *createModel* створює БДР, необхідні для роботи моделі, та змінює їхні розміри відповідно до кількості агентів у мережі. Наприклад, для представлення зв'язків між агентами БДР повинна містити три групи змінних, кожна з яких повинна мати можливість описати *agentCount* змінних.

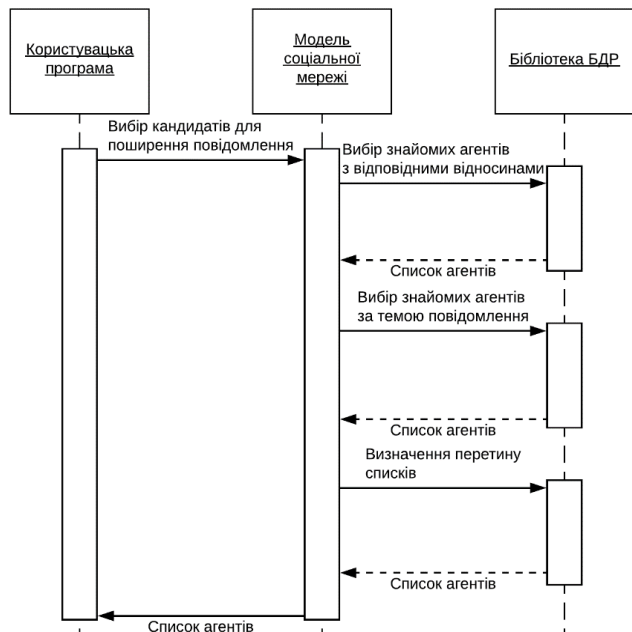


Рис. 5. Діаграма діяльності ініціювання пошуку в БДР

Далі створюємо масив *varParams*, який необхідний для іменування змінних, збережених у БДР. У нього буде записуватися результат перетворення маршруту всередині БДР на групи змінних та їхні значення. У циклі для кожного агента випадковим чином обираємо іншого агента, та встановлюємо між ними взаємний зв'язок за допомогою двох викликів функції *modelAddContact*, яка працює таким чином:

1. Якщо початкове ставлення не вказане – визначити його випадковим чином.

2. Знайти усіх знайомих агента, з яким встановлюється зв'язок.

3. Для кожного знайомого визначити нове ставлення на основі існуючих ставлень між агентами. Якщо агент, який встановлює зв'язок, уже має ставлення до цього знайомого – оновити ставлення.

4. Зберегти ставлення до агента, з яким встановлюється зв'язок.

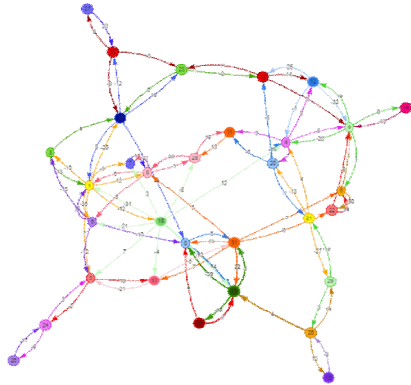


Рис. 6. Графік соціальної мережі з 32 вузлів

Далі ми ініціюємо пошук для БДР, щоб знайти усі існуючі ставлення у мережі. За допомогою виразу  $x = \text{searchBddParams}(\text{model} \rightarrow \text{relations})$  ми отримуємо наступний допустимий маршрут всередині БДР, яка зберігає відносини між агентами, а за допомогою функції  $\text{generateBddVarParams}(\text{model} \rightarrow \text{relations}, \text{varParams})$  ми перетворюємо маршрут у набір змінних. Коли  $x$  буде рівним нулю, потрібно буде вийти з циклу, оскільки це означає, що ми обійшли усі допустимі маршрути; в іншому випадку змінна  $x$  зберегатиме ставлення між агентами, номери яких представлені у масиві  $\text{varParams}$ .

Таким чином, процедура встановлення зв'язку передбачає обмін знайомими, тобто якщо агенти  $A$  та  $B$  уже знайомі, і агент  $C$  знайомиться із агентом  $A$ , то існує ймовірність, що агент  $C$  дізнається про агента  $B$ . Нижче наведено приклад обміну знайомими у мережі із чотирьох агентів. Дані наведено у форматі  $x \rightarrow y : v$ , де  $x$  та  $y$  – номери агентів,  $x$  – початок дуги,  $y$  – кінець дуги,  $v$  – вага дуги,  $v \in [-50; 50]$ .

$1 \rightarrow 0 : 7; 1 \rightarrow 2 : 7; 0 \rightarrow 1 : 6; 2 \rightarrow 1 : -43.$

У цьому випадку агент 1 має слабке позитивне ставлення до агентів 0 та 2, агент 0 має слабке позитивне ставлення до агента 1, а агент 2 має сильне негативне ставлення до агента 1. Додавши зв'язок між агентами 3 та 2, ми отримаємо такі зв'язки:

$1 \rightarrow 0 : 7; 1 \rightarrow 2 : 7; 0 \rightarrow 1 : 6; 2 \rightarrow 1 : -43; 3 \rightarrow 2 : 23; 2 \rightarrow 3 : -7; 3 \rightarrow 1 : -10.$

Як можна побачити, у агента 3 з'явилося додаткове ставлення до агента 1, хоча ми не здійснювали окреме знайомство між ними. Ставлення до таких знайомих визначається на основі добутку відомих відносин. Ставлення агента 3 до агента 1 негативне, оскільки агент 3 має позитивне ставлення до агента 2, а агент 2 має негативне ставлення до агента 1. Якби ставлення агента 3 до агента 2 було негативним, то його ставлення до агента 1 було б позитивним (за принципом «ворог мого ворога – мій друг»).

Поширені знайомства легко виявити на графіку соціальної мережі, оскільки вони асиметричні (рис. 6). Можна побачити, що ця мережа схожа на мережі «тісного світу» та безмасштабні мережі, оскільки багато агентів пов'язані між собою у коло, проте існують також відокремлені групи агентів. Змінивши правила встановлення нового контакту, можна наблизитися до одного із цих видів мереж.

## Висновки

У даній роботі було реалізовано такі задачі:

- досліджено можливість застосування бінарних діаграм рішень у реалізації моделі соціальної мережі та описано способи адаптації БДР до представлення орієнтованих графів;
- розроблено модель мережі репутації користувачів соціальних веб-ресурсів на основі бінарних діаграм рішень.

Як було виявлено після проведених досліджень:

- 1) бінарні діаграми рішень – один із найбільш компактних способів представлення матриці суміжності орієнтованого графу у пам'яті комп'ютера;
- 2) значення, представлені за допомогою бінарних діаграм рішень, складно редагувати;
- 3) алгоритм накопичення змін до БДР дозволяє зменшити кількість операцій над БДР;
- 4) пошук ребра за початковою чи кінцевою вершиною у орієнтованому графі, представленому за допомогою бінарної діаграми рішень, має однакову складність;
- 5) введення тематичних зв'язків між агентами соціальної мережі дозволяє покращити процес поширення повідомлень у мережі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мелешко Є.В. Дослідження методів аналізу соціальних мереж з точки зору інформаційної безпеки держави / Є. В. Мелешко, В. С. Гермак, М. С. Якименко // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2015. - Вип. 2. - С. 92-100. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz\\_2015\\_2\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2015_2_26)
2. Shi L. Apply social network analysis and data mining to dynamic task synthesis for persistent MMORPG virtual world / L. Shi, W. Huang // International Conference on Entertainment Computing. – Berlin: Springer, 2004. – pp. 204–215.
3. Kempe D. Maximizing the spread of influence through a social network / D. Kempe, J. Kleinberg, E. Tardos. // Proceedings of the ninth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. – 2003. – pp. 137–146.
4. Leskovec J. The dynamics of viral marketing / J. Leskovec, L. Adamic, B. Huberman. // ACM Transactions on the Web (TWEB). – 2007. – №1:1.
5. Губанов Д. Модели влияния в социальных сетях / Д. Губанов, Д. Новиков, А. Чхартишвили. // Управление большими системами: сборник трудов. – 2009. – №27. – С. 205–281.
6. Watts D. Influentials, networks, and public opinion formation / D. Watts, P. Dodds. // Journal of consumer research. – 2007. – Vol. 34. – pp. 441–458.

7. Мирзануров Д. Методика защиты от таргетированной информации, распространяемой в системах SOCIAL NETWORK / Д. Мирзануров. // Приволжский научный вестник. – 2015. – №46. – С. 40–43.
8. Cost-effective outbreak detection in networks / [J. Leskovec, A. Krause, C. Guestrin та ін.]. // Proceedings of the 13th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. – 2007. – pp. 420–429.
9. Hamill L. Social Circles: A Simple Structure for Agent-Based Social Network Models [Електронний ресурс] / L. Hamill, N. Gilbert // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/3.html> (дата звернення: 05.10.2018).
10. Карпов Ю. Г. MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем / Юрий Глебович Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – С. 295–366
11. Brain M. The Importance of Memory Management in C [Електронний ресурс] / M. Brain, S. Crawford. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <https://computer.howstuffworks.com/c-programming11.htm>.
12. Кнут Д. Э. Искусство программирования, том 4, А. Комбинаторные алгоритмы, часть 1 / Дональд Эрвин Кнут; пер. с англ. И. В. Красикова. – М.: ООО "И. Д. Вильямс", 2013. – 960 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. Г. Семенов,  
 Національний технічний університет «ХПІ», Харків  
 Received (Надійшла) 10.08.2019  
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

### Software for modelling social media users' reputation networks based on binary solution diagrams

V. Mikhav

The **object** of the article is the process of modelling social networks. The **goal** is to develop software for modeling social media users' reputation networks based on binary solution diagrams. The **tasks** to be solved are: to investigate the possibility of modeling social networks based on binary diagrams of solutions, to develop a method of modeling the reputation networks of users of social web resources on the basis of binary diagrams of solutions, to develop software to implement the developed method of modeling the reputation networks of users. **Research Methods:** Graph Theory, Modeling Theory, Algorithm Theory, Object Oriented Programming. The following **results** were obtained: a method of accumulating changes in binary diagrams of solutions was developed to reduce the number of edits; developed a model of reputation of users of social web resources on the basis of binary diagrams of solutions. **Conclusions:** A study of the possibility of using binary diagrams of solutions for modeling social networks was conducted. The main types of social networks and methods of their analysis are considered in detail. The urgency of the development and application of the methodology of social network analysis, in particular in modern information technologies, is revealed. The models of social network analysis have been reviewed, taking into account the fact that social units do not act independently, but on the contrary, affect each other. Research results show that binary solution diagrams are one of the most compact ways to represent the structure of social networks, because the structure of binary solution diagrams allows you to create relationships between more than two agents. The developed method of accumulating changes in binary diagrams of solutions to reduce their number of edits allows to reduce the number of operations on binary diagrams of solutions. A method of modeling the reputation systems of users of social web resources is developed. The developed software model of the reputation of users of social web resources on the basis of binary diagrams of decisions allows to model the dissemination of information on social networks taking into account the reputation of the users of the network.

**Keywords:** social network, reputation network, binary decision diagrams, modelling, information dissemination.

### Программное обеспечение для моделирования сетей репутации пользователей социальных веб-ресурсов на основе бинарные диаграммы решений

В. В. Михав

**Объектом** изучения в статье является процесс моделирования социальных сетей. **Целью** является разработка программного обеспечения для моделирования сетей репутации пользователей социальных веб-ресурсов на основе бинарных диаграмм решений. **Задача:** исследовать возможность моделирования социальных сетей на основе бинарных диаграмм решений, разработать метод моделирования сетей репутации пользователей социальных веб-ресурсов на основе бинарных диаграмм решений, разработать программное обеспечение для реализации разработанного метода моделирования сетей репутации пользователей. **Методы исследований:** теория графов, теория моделирования, теория алгоритмов, объектно-ориентированное программирование. Получены следующие **результаты:** разработан метод накопления изменений в бинарных диаграммах решений для уменьшения количества их изменений; разработана модель е-режиме репутации пользователей социальных веб-ресурсов на основе бинарных диаграммах решений. **Выводы:** проведено исследование возможности использования бинарных диаграмм решений для моделирования социальных сетей. Подробно рассмотрены основные типы социальных сетей и методы их анализа. Раскрыта актуальность развития и применения методологические логики анализа социальных сетей, в частности в современных информационных технологии. Проведен обзор моделей анализа социальных сетей, с учетом того, что социальные единицы не действуют независимо, а наоборот, влияют друг на друга. Результаты исследований показали, что бинарные диаграммы решений - это один из самых компактных способов представления структуры социальных сетей, ведь структура бинарных диаграммах решений позволяет создавать отношения между более чем двумя агентами. Разработанный метод накопления изменений в бинарных диаграммах решений для уменьшения количества их изменений позволяет уменьшить количество операций над бинарными диаграммами решений. Разработан метод моделирования сетей репутации пользователей социальных веб-ресурсов. Разработана программная модель сети репутации пользователей социальных веб-ресурсов на основе бинарных диаграммах решений позволяет моделировать распространение информации в социальных сетях с учетом репутации пользователей сети.

**Ключевые слова:** социальная сеть, сеть репутации, бинарные диаграммы решений, моделирование, распространение информации.

S. Suhak<sup>1</sup>, L. Shabanova-Kushnarenko<sup>2</sup>, M. Siruk<sup>3</sup>, N. Bihun<sup>4</sup>, A. Mishchenko<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Military unit A0106, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> Military unit A0796, Rivne, Ukraine

<sup>4</sup> Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv

<sup>5</sup> Military institute of telecommunications and informatization named after Heroes of Kruty, Kyiv

## DATA PROCESSING CENTER AS THE BASIS OF INFORMATION SECURITY OF THE DEFENSE MINISTRY OF UKRAINE

Nowadays, the development of information technologies determines the successful functioning of the political system, since they allow to control political processes, prevent social and political conflicts. Increasing the level of reliability of the information, the most effective use of information resources, external and internal information ropes increase the stability of the political system, stability of the socio-political development of the country. The combination of different telecommunication technologies that create the preconditions for building flexible and high-performance service-oriented systems can be used to solve problems in different industries. However, nowadays, one of the constraints on the implementation and further development of such networks is the theoretical under-development of service delivery models, due to the lack of comprehensive information on the structure of data center networks. During the research conducted by the authors, it was found that the data processing center is the basis for informing the defense ministry of Ukraine. During the research, the authors used general scientific methods of analysis and synthesis, as well as the basic provisions of the theory of informatics, the theory of complex technical systems, the theory of information, etc. During the research, the authors substantiated the main tasks that will be performed by the data processing center of the defense ministry of Ukraine, identified the main information and calculation tasks that will be performed by them. The authors also substantiated the requirements for building a data center of the Defense Ministry of Ukraine. The authors evaluated modern technological solutions and software and hardware for the creation of the information infrastructure of the defense ministry of Ukraine. Possible technical and software for building a reliable and secure data processing center of the defense ministry of Ukraine are proposed. Therefore, the prospective direction of further scientific research of the authors should be considered the justification of ways of improvement of informatization of the armed forces of Ukraine and the creation of information infrastructure of the defense ministry of Ukraine are mobile data centers. This will allow the deployment of information infrastructure in various conditions, including in the open space, which is very relevant for the specifics of actions in the east of Ukraine.

**Keywords:** informatization, data center, the defense ministry of Ukraine, cloud computing, telecommunication technologies.

### Introduction

The proposed information technology, service engineering, and telecommunications systems are iyeeshn new pre-projector requests that attempt to create the theoretically unrestricted multiple services that are available. Successful information technology (IT) experience has placed a generator of positive applied active people in various spheres of human life, including in the use of military force and weapons to succeed in military affairs.

In recent years, and in Ukraine, special attention has been given to this issue, so, according to the strategic defense bulletin, the following has been defined: Objective 1.4. Creation of an effective system of operational (combat) command, communication, intelligence and surveillance (C4ISR) ", the end result of which is: creation of a national telecommunication network, modernization and transfer to modern digital technologies of the special communication system, departmental information and communication networks and communication systems for public authorities, as well as the creation of an automated C4ISR component of defense forces that meets NATO standards, doctrines and recommendations, and ensures its integration into NATO system defense management..." [1].

The combination of different telecommunication technologies that create the preconditions for building flexible and high-performance service-oriented systems

can be used to solve problems in different industries. However, today, one of the constraints on the implementation and further development of such networks is the theoretical under-development of service delivery models due to the lack of comprehensive data on the structure of the data network center (DNC). Therefore, in the process of providing a composite service, the parameters of the information and telecommunication infrastructure should be taken into account in order to optimally select the elementary components of this service or to migrate it in its virtualized implementation.

The transition to new strategies for implementing public information policy in Ukraine and the use of information in the civilian and military sectors proves that at present our state cannot claim competitiveness without an effective information infrastructure [1-3].

Nowadays, the development of information technologies determines the successful functioning of the political system, since they allow to control political processes, prevent social and political conflicts. Increasing the level of reliability of the information, the most effective use of information resources, external and internal information ropes increase the stability of the political system, stability of the socio-political development of the country.

Therefore, according to the authors, the problem of informatization of the armed forces of Ukraine, one of the directions of which is the creation of the information infrastructure of the defense ministry of Ukraine, is very urgent.

The issue of implementation of information policy and application of modern information technologies in the Armed Forces of Ukraine is a superficially researched question.

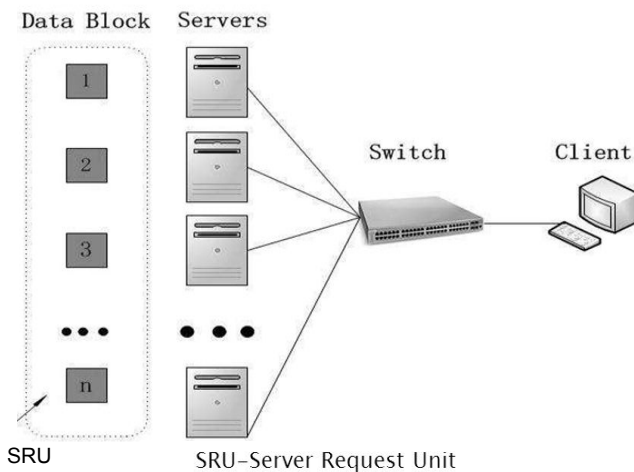
Therefore, *the purpose of the article* is to evaluate modern technological solutions and software to create a hardware and software platform for the information infrastructure of the defense ministry of Ukraine.

**Presentation of the main material**

Informatization of the armed forces of Ukraine is a component of informatization of the state and includes the process of creation, implementation and application in different spheres of their activity in peacetime and wartime modern methods, systems and devices of extraction, processing, storage, transmission and use of information. This implies the creation of information infrastructure of the defense ministry of Ukraine, further development of the information and telecommunication network of the armed forces of Ukraine, implementation of the project of the unified automated system in the armed forces of Ukraine [3].

The center of data processing of the Armed Forces of Ukraine should become the software-hardware base and the main component of the information infrastructure of the Ministry of Defense of Ukraine.

A typical DNC structure is shown in Fig. 1.



**Fig. 1.** Typical DNC structure

The main functions of the DNC of the armed forces of Ukraine should be ensured the guaranteed data integrity, continuity of application systems, tasks and services, constant readiness and accessibility of information for users. The tasks of the future DNC of the armed forces of the country are:

- the provision of technological resources in accordance with the growing volume of information being processed;
- ensuring the rapid commissioning of new systems;
- providing guaranteed data retention, backup and data recovery;
- improving the performance of storage systems and their optimization;
- the maintenance of continuity of processes and scalability of information infrastructure.

The approach to creating a data center for the armed forces of Ukraine should be based on the following principles:

- complexity, i.e. to include a complete set of works taking into account the integration of all components into a single information infrastructure;
- multi-vendor, ie each component of the data center can be implemented on the basis of equipment or software of different manufacturers, which will allow to create the optimal solutions in functionality.

The DNC engineering infrastructure is responsible for communications, power supply and cooling and must ensure the smooth and reliable operation of all information systems. The selection of equipment and design of engineering systems is made taking into account the prospects of further development of the DNC, as well as based on the requirements for the level of reliability and availability of information services.

A DNC engineering solution should be aimed to reduce the likelihood of downtime in information systems, which may be due to equipment malfunctions, routine preventive work, or malfunctions caused by personnel errors. The DNC engineering infrastructure has the following components:

- general and uninterruptible power supply systems meeting the requirements for electricity quality and continuity;
- air-conditioning equipment to provide the required values of temperature and humidity in specified ranges throughout the volume of the DNC premises;
- cable system for the creation of reliable physical communication lines of guaranteed quality between the DNC equipment;
- assembly constructions for placement of server and switching equipment of DNC;
- the center floor of the DNC for placement of communication, power cables, pipelines of the system of support of climatic parameters, distribution of cold air, laying of cable lines in the data center premises;
- DNC grounding system for the connection of data center equipment to grounding bus;
- fire extinguishing system.

Table 1 shows possible solutions from various manufacturers for the construction of engineering infrastructure.

**Table 1 – Is the possible solutions from different manufacturers on engineering infrastructure construction**

Comprehensive solution	Rittal, APC, BTICINO
Uninterrupted power supply	Eaton, APC, Neuhaus
Climate control	Stulz, Uniflair, Emicon, Liebert
Mounting constructions 19"	Rittal, Електросила, Conteg
False floor	Uniflair, Jansen

If they approach the critical values, the system promptly informs the dispatcher. Also, the system must implement the function of controlling the work of engineering equipment and provide the ability to automatically prevent the development of emergencies according to the given algorithms [4-6].

The system of monitoring and management of the engineering infrastructure consists of the following components.

*Lower level:*

- sensors of engineering subsystems of DNC;
- interface converters for gathering information from sensors of engineering subsystems;
- sensors for climate control in server racks in DNC premises;
- current transformers for controlling the parameters of the electricity supply as a whole for the DNC and for each consumer separately.

*Intermediate level (automation level):*

- a network of programmable logic controllers using open technology and standard protocols.

*Top level (level of visualization):*

- an automated workplace manager that provides a convenient interface to access the controlled parameters of the data center.

Server hardware is the core of the DNC. The server park should be reasonably productive and redundant, easily managed and scalable, and economical in terms of energy consumption.

Servers, which are dedicated to certain information systems are most often used inefficiently: in the vast majority of cases, their useful load does not exceed 10-15%. Thus, over 70% of the DNC computing capacity is actually idle. To solve this problem, it is advisable to use virtualization technology [2].

Server virtualization allows you to create multiple virtual machines on a separate physical server, each of which solves a separate task.

Thus, multiple virtual servers can run on the same physical server, increasing its aggregate payload. As a result, the degree of server usage can increase up to 70-80%, which will reduce the total number of servers in the DNC and reduce the cost of their acquisition and support.

Data storage systems (DSS) are used to ensure the reliability of storage, high availability and the efficiency of providing large amounts of information. It is advisable to use storage networks to connect DSS to servers, since the direct connection of storage limits scalability and controllability. It is possible to use a multilevel storage model to organize the storage of large amounts of information efficiently. This concept assumes a hierarchical division of information depending on the level of its demand by users [5].

A backup and restore system is a software system that prevents loss of information in the event of equipment malfunction, as well as software or user errors. The backup system must allow the DNC to be stored in full. This guarantees complete recovery of information in the shortest possible time, reduces downtime of the DNC and associated material losses.

Within the DNC project, it is possible to use modern backup systems that support all types of remote copying, mirroring and replication of data (including in real-time) from various sources, using tools for easy copy management in heterogeneous information infrastructure.

Designing and deploying a network infrastructure is one of the most important steps in creating a DNC, as only a properly planned network can provide optimal

availability and productivity, the security of its resources, uninterrupted user access and business continuity. The DNC network infrastructure must be implemented through a switched factory that connects the various DNC components: applications, servers, dedicated devices, storage systems and users.

There are four key components to a DNC network architecture:

- a network of high-performance computing to ensure server interaction in high-performance clusters;
- a storage network to consolidate memory resources so that they can be distributed and used more efficiently;
- a network of interconnection with the backup DNC, which connects the main and backup DNC over optical or traditional networks and provides replication and mirroring of data;
- an access network that provides secure access for users.

Uninterrupted operation of all DNC components is not possible without the use of specific physical and information security solutions. DNC physical security systems protect equipment from fire and thermal damage, water and flooding, as well as electromagnetic radiation. In addition, DNC physical security systems prevent the penetration of unauthorized persons and unauthorized access to equipment [2].

In order to protect the information stored and processed in the DNC, it is necessary to use the experience and technologies of leading manufacturers. Decisions must guarantee protection against network attacks, embedded executable code, and unauthorized access to data. This ensures the maximum level of failure of the DNC 1 eliminates the risk of information leakage [4].

### **The conclusion from the article**

The analysis showed that the creation of a single information space is a long and objective process that requires the improvement of forms and methods of information systems management, further centralization and integration of computer databases and the introduction of advanced computer information technologies for the widespread use of effective and powerful computer networks, application of specialized security and information security tools, establishing effective information sharing between users. The authors evaluated modern technological solutions and software and hardware for the creation of information infrastructure of the defense ministry of Ukraine, an integral component of which is the data center.

The article proposes one of the options of hardware and software for building a reliable and secure data processing center of the armed forces of Ukraine. A further direction of the authors' scientific research should be considered in the justification of ways of improving the informatization of the armed forces of Ukraine and the creation of information infrastructure of the defense ministry of Ukraine on the basis of mobile DNC. This will allow the deployment of information infrastructure in different conditions, including in the open space, which is very relevant for the specifics of actions in the east of Ukraine.

## 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>.
2. Petrushen, M.V(2014). "Evaluation of modern technological solutions and software and hardware for the creation of a data center in the Armed Forces of Ukraine". Control, navigation and communication systems. Poltava: PNTU named after Yuriy Kondratyuk. No 31. pp. 155-160.
3. Minster J. - B., Capitaine N. and Clark D. M(2009). "The new ICSU World Data System: A world-wide community of excellence for data issues". Materials of the Intern. Conf. "Electronic Geophysical Year: State of the Art and Results" / Ed. by V. Nechitailenko, GC RAS, Moscow, 117 p. doi:10.2205/2009-REGYconf.
4. Guide to the World Data Center System: General Principles. World Data Centers. Data Services. Paris.: ICSU, 1996. 110 p.
5. Volpe, F(2003). QuickBird High Resolution Satellite Data for Urban Applications. Volpe Fabio, etc. 3 p. [http://eurimage.com/products/tech\\_papers/qb\\_urban-applications.pdf](http://eurimage.com/products/tech_papers/qb_urban-applications.pdf).
6. Greenberg, A, Hamilton, J, David, Maltz, A. and Patel, P(2009). "The Cost of a Cloud: Research Problems in Data Center Networks". Computer Communication Review. No. 39(1). pp. 68-73.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О. І. Тимочко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Received (Надійшла) 19.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.09.2019

### Центр обробки даних як основа інформаційного забезпечення Міністерства оборони України

С. О. Сугак, Л. В. Шабанова-Кушнаренко, М. Г. Сірик, А. О. Міщенко

Сьогодні розробка інформаційних технологій визначає успішне функціонування політичної системи, оскільки вони дозволяють здійснювати контроль над політичними процесами, запобігати соціальним і політичним конфліктам. Підвищення рівня достовірності та надійності інформації, найбільш ефективне використання інформаційних ресурсів, зовнішніх і внутрішніх інформаційних каналів підвищують стійкість політичної системи, стабільність соціально-політичного розвитку країни. Поєднання різних телекомунікаційних технологій, які створюють передумови для побудови гнучких та високопродуктивних сервісоорієнтованих систем, можуть використовуватись для розв'язання задач у різних галузях. Однак, на сьогодні, одним із стримуючих факторів щодо впровадження та подальшого розвитку таких мереж є теоретичне недоопрацювання моделей надання сервісів, що зумовлені відсутністю вичерпних відомостей про структуру мереж центрів оброблення даних. В ході проведеного авторами дослідження встановлено, що основою інформатизації Міністерства оборони України є центр обробки даних, обґрунтовані основні завдання, які їм будуть виконуватись, визначено основні інформаційно-розрахункові задачі. Обґрунтовано вимоги щодо побудови центру обробки даних Міністерства оборони України. Проведена оцінка сучасних технологічних рішень та програмно-апаратних засобів щодо створення інформаційної інфраструктури. Запропоновані можливі технічні та програмно-апаратні засоби для побудови надійного та безпечного центру обробки даних. Перспективним напрямком подальших наукових досліджень авторів слід вважати обґрунтування шляхів удосконалення інформатизації Збройних Сил України та створення інформаційної інфраструктури Міністерства оборони України є мобільні центри обробки даних. Це дозволить розгорнути інформаційну інфраструктуру у різних умовах, у тому числі на відкритому просторі, що є актуальним для специфіки дій на Сході України.

**Ключові слова:** інформатизація, центр обробки даних, Міністерство оборони України, хмарні обчислення, телекомунікаційні технології.

### Центр обработки данных как основа информационного обеспечения Министерства обороны Украины

С. А. Сугак, Л. В. Шабанова-Кушнаренко, Н. Г. Сирьк, А. А. Мищенко

Сегодня разработка информационных технологий определяет успешное функционирование политической системы, поскольку они позволяют осуществлять контроль над политическими процессами, предотвращать социальным и политическим конфликтам. Повышение уровня достоверности и надежности информации, наиболее эффективное использование информационных ресурсов, внешних и внутренних информационных каналов повышают устойчивость политической системы, стабильность социально-политического развития страны. Сочетание различных телекоммуникационных технологий, которые создают предпосылки для построения гибких и высокопроизводительных сервісоорієнтованих систем, могут использоваться для решения задач в различных областях. Однако, на сегодняшний день, одним из сдерживающих факторов по внедрению и дальнейшему развитию таких сетей является теоретическое недоработки моделей предоставления сервісів, обусловленные отсутствием исчерпывающих сведений о структуре сетей центров обработки данных. В ходе проведенного авторами исследования установлено, что основой информатизации Министерства обороны Украины является центр обработки данных обоснованы основные задачи, которые будут им выполняться, определены основные информационно-расчетные задачи. Также авторами обоснованы требования к построению центра обработки данных. Проведена оценка современных технологических решений и программно-апаратных средств по созданию информационной инфраструктуры. Предложены возможные технические и программно-апаратные средства для построения надежного и безопасного центра обработки данных Министерства обороны Украины. Перспективным направлением дальнейших научных исследований авторов следует считать обоснование путей совершенствования информатизации Вооруженных Сил Украины и создание информационной инфраструктуры Министерства обороны Украины есть мобильные центры обработки данных. Это позволит развернуть информационную инфраструктуру в различных условиях, в том числе на открытом пространстве, что актуально для специфики действий на Востоке Украины.

**Ключевые слова:** информатизация, центр обработки данных, Министерство обороны Украины, облачные вычисления, телекоммуникационные технологии.

О. В. Чмихова<sup>1</sup>, П. Ф. Шапов<sup>1</sup>, В. В. Куліченко<sup>1</sup>, О. В. Горбуліч<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківська медична академія післядипломної освіти, Харків, Україна

## ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДІАБЕТИЧНИХ СТАНІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПОЛІНОМІАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ ГЛІКЕМІЇ

**Предметом дослідження** є елементи аналітичного і структурного синтезу процедури ідентифікації моделі динаміки глікемії за критерієм максимальної правдоподібності. **Метою роботи** є зменшення ризиків ідентифікації діабетичних станів при використанні поліноміальних моделей динаміки глікемії. **Завдання.** На основі результатів глюкозотолерантного тестування дослідити можливості параметричного розпізнавання діабетичних станів, коли динаміка рівня глюкози апроксимується поліноміальною моделлю будь-якого порядку. Використати аналітичний вираз для мінімуму середнього ризику для структурного синтезу процедури ідентифікації виду діабету. Підтвердити ефективність використання отриманої структурної схеми процедури ідентифікації моделі динаміки глікемії при глюкозотолерантному тестуванні. **Висновки.** Розроблено блок-схему з адаптивною (по відношенню до кількості ідентифікованих глікемічних моделей) структурою і відповідна їй комп'ютеризована система багатосторонньої ідентифікації моделей динаміки глікемії за двома глюкозотолерантними тестами. Доведено можливість підвищення достовірності діагностики при використанні запропонованого методу, у порівнянні зі стандартним від значення 0,972 до 0,974 (обсяг навчальної вибірки  $N = 60$ ).

**Ключові слова:** діабетичний стан, динаміка глікемії, параметрична ідентифікація, поліноміальна модель, середній ризик, алгоритм ідентифікації.

### Вступ

В даний час розроблений досить широкий клас моделей динаміки глікемії стандартна модель [1], вдосконалена модель [2], поліноміальна [3], які базуються на використанні фіксованої кількості інформативних параметрів (ознак). Всі перераховані моделі оперують точними [2] або статистично наближеними [3] залежностями вимірюваного рівня глюкози в функції часу тестування. Перевага точних моделей – адекватність біохімічним змінам кількісного складу крові. Недолік – невизначеність математичної моделі за функціональним змістом. Перевага наближених моделей – опис біохімічного об'єкта в просторі використовуваних параметрів, що дозволяє замінити задачу кількісної ідентифікації (визначається точністю математичного опису динаміки глікемії) завданням параметричного розпізнавання образів, зберігаючи, практично, незмінною достовірність ідентифікації. Недолік – залежність моделі розпізнавання від якості навчання (точності оцінювання коефіцієнтів), пов'язаного з обсягом навчальної вибірки. Однак, такий недолік можна асимптотично звести до статистично обґрунтованого мінімуму, збільшуючи обсяги навчальних вибірок.

**Метою роботи** є мінімізація ризиків ідентифікації діабетичних станів, для глюкозотолерантних тестів, при використанні поліноміальних моделей динаміки глікемії. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) розробити аналітичний вираз для мінімуму середнього ризику при параметричному розпізнаванні діабетичних станів методом максимальної правдоподібності;

2) синтезувати структурну схему алгоритму ідентифікації моделі динаміки глікемії на основі розпізнавання по мінімуму середнього ризику;

3) підтвердити ефективність розробленого алгоритму ідентифікації на експериментальному матеріалі клінічних глюкозотолерантних тестів.

### Результати досліджень

**1. Формалізація моделей ідентифікації.** Будемо розглядати процедуру ідентифікації таких моделей як параметричну, за умови, що числові характеристики інформативних ознак для кожної з моделей – відомі. Якщо в якості числових характеристик використовується математичне очікування і дисперсія ознак при апріорних припущеннях нормальності (або хоча б симетричності) законів розподілу ознак, то процедура ідентифікації буде еквівалентна процедурі параметричного розпізнавання виду моделі динаміки глікемії. Введемо поняття вектору параметрів  $\bar{X}$ , складовими якого є  $p$  інформативних ознак:

$$\bar{X} = (x_1, \dots, x_p),$$

де  $p$  – розмірність простору інформативних ознак.

Нехай  $(x_1, \dots, x_p)$  – сукупність результатів вимірювань значень  $p$  контрольованих величин, що утворюють вектор  $\bar{x} = (x_1, \dots, x_p)$ , і залежать від того, який з станів має місце. Нехай  $f(\bar{x} | \Theta_k)$  – умовний розподіл цього вектору, що відповідає стану  $\Theta_k$ . Є також: набір рішень  $\gamma_1, \dots, \gamma_m$  ( $m$  – кількість ідентифікованих моделей динаміки глікемії). Є також правило вибору рішень  $\gamma(\bar{x})$ , що приписує кожному можливому результату одне з рішень, матриця втрат  $\Pi_{jk}$ , що враховують наслідок вибору рішення  $\gamma_j$  при дійсному стані  $\Theta_k$ . Заданий також критерій якості  $R_0$  правила вибору рішення [4]. В рамках теорії перевірки статистичних гіпотез [4, 5] набір рішень являє собою ряд логічних тверджень про вид стану  $\Theta$ , тобто про те, яка з гіпотез,  $h_1 : \Theta \in \Theta_1, \dots, h_m : \Theta \in \Theta_m$ , істинна. Одна з гіпотез множини  $\{\gamma_1, \dots, \gamma_m\}$  може бути нульовою, а



інші тоді, утворюють складну альтернативну гіпотезу. Ідентифікація одного з станів  $\{\Theta_1, \dots, \Theta_m\}$  зводиться, таким чином, до параметричного тестування вектора вимірних значень за допомогою функції, еквівалентній середньому ризику

$$R_0 = F \left[ \left\{ f(\bar{x} | \Theta_k) \right\}, \Pi_{jk}, \{P_1, \dots, P_m\} | \bar{x} \right] \quad (1)$$

при заданому  $\gamma(\bar{x})$ . Це означає, що простір всіх можливих вибірок значень випадкового вектору контрольованих величин  $\bar{X}$  має бути розділений на  $m$  непересічних областей, з яких одна – це область прийняття рішення, а що залишилися – це критична область  $\bar{\omega}$ . При такому тестуванні можливі помилки першого і другого роду, ймовірності яких

$$\alpha = P \left[ \gamma_j | \bar{x} \in \omega; \Theta \in \Theta_k \right], k \neq j; ;$$

$$\beta = P \left[ \gamma_k | \bar{x} \in \bar{\omega}; \Theta \notin \Theta_k \right].$$

Слід зазначити, що правило вибору рішення  $\gamma(\bar{x})$  задається до початку тестування.

Теоретичною основою розглянутої загальної моделі прийняття рішень є байєсівська теорія рішень [6], яка складає основу дискримінантного аналізу [7]. В рамках такого аналізу добре розроблені моделі параметричної дискримінації для об'єктів контролю з двома, ( $m = 2$ ), станами  $\Theta_1, \Theta_2$ .

У класичній теорії статистичних рішень [8] такі моделі реалізують параметричні тести двосторонньої класифікації. Якщо число діагностованих станів більше двох ( $m \geq 3$ ), то дискримінація базується на параметричних тестах багатосторонньої класифікації. Збільшення числа діагностованих (дискримінованих) станів різко ускладнює модель прийняття рішень, оскільки для кожного з станів необхідно апіорі знати числові характеристики інформативних ознак (хоча б на рівні середніх значень і дисперсій). Така апіорна інформація може бути отримана тільки на етапі навчання системи дискримінації, що еквівалентно створенню імовірнісних моделей для стандартних зразків інформативних ознак по апіорі встановленим видам діагностованих станів. Оскільки етап навчання вимагає досить великих обсягів виміральної багатовимірної інформації, що досить проблематично для більшості прикладних задач медичної діагностики, то в більшості випадків моделі такої діагностики – це двосторонні тести.

Спроби вирішення завдання багатосторонньої класифікації здійснено лише при обмеженнях на ймовірність помилки першого роду  $\alpha$  і являють собою моделі тестування на значимість, з апіорі невідомою ймовірністю помилки другого роду  $\beta$ . Практично, всі існуючі моделі дискримінації розроблені для випадків, коли багатовимірна щільність  $f(\bar{x} | \Theta_k)$ ,  $k = \overline{1, m}$ , є невідродженим  $p$ -мірним нормальним розподілом з однаковими або різними за класами  $\Theta_1, \dots, \Theta_m$  коваріаційними матрицями.

**2. Синтез цільової функції мінімізації середнього ризику.** Практика використання багатовимірного дискримінантного аналізу при обмеженнях на обсяги навчальних вибірок і на кількість апіорних припущень про їх імовірнісні властивості [9] показує, що в основу процедури ідентифікації моделей динаміки глікемії зручно поставити метод максимальної правдоподібності. Особливу цінність метод максимальної правдоподібності, в нашому випадку, набуває через його головну властивість – забезпечувати мінімум середнього ризику при глобальному максимумі функції правдоподібності. Критерій максимальної правдоподібності може бути реалізований в векторній формі як цільова функція вигляду [10]:

$$W(\bar{x} | \Theta_k) = (2\pi)^{-\frac{p}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\bar{x} - \mu^{(k)})' \Sigma^{-1} (\bar{x} - \mu^{(k)}) \right]$$

для стану  $\Theta_k$  – максимальна ( $\bar{x}$  – вектор стовпець вимірних значень;  $\mu^{(k)}$  – вектор умовних середніх;  $\Sigma$  – матриця коваріацій). Слід врахувати, що визначник коваріаційної матриці повинен відповідати умові невідродженості розподілу  $W(\bar{x} | \Theta_k)$ , тобто  $|\Sigma| > 0$ .

В якості інформативних ознак використовуються статистично незалежні величини, випадковість яких обумовлена непереборною невизначеністю моделей динаміки глікемії. Така невизначеність посилюється обмеженістю виміральної багатовимірної інформації, використовуваної для навчання системи ідентифікації.

Кожну зі складових вектору ознак  $\bar{X}$  будемо вважати випадковою величиною  $x_i^{(k)}$  з умовною нормальною щільністю розподілу  $f(x_i^{(k)})$ , де  $k$  – номер ідентифікованого стану:

$$f(x_i^{(k)}) = \text{NORM} \left( \bar{X}_i^{(k)}, (\sigma_i^{(k)})^2 \right); i = \overline{1, p}; k = \overline{1, m}.$$

Функція правдоподібності в скалярній формі для всіх  $p$  інформативних ознак є такою:

$$F(\bar{X} / \Theta_k) = (2\pi)^{-\frac{p}{2}} \prod_{i=1}^p (\sigma_i^{(k)})^{-1} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^{(k)}}{\sigma_i^{(k)}} \right)^2}.$$

Для зручності подальшого аналізу прологарифмуємо цю функцію правдоподібності, враховуючи, що така операція не змінює координати логарифмічного перетворення по відношенню до значень інформативних параметрів [10]:

$$\ln F(\bar{X} / \Theta_k) = -\frac{p}{2} \ln(2\pi) - \sum_{i=1}^p \ln \sigma_i^{(k)} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^{(k)}}{\sigma_i^{(k)}} \right)^2.$$

Для зручності роботи з позитивними значеннями логарифма функції правдоподібності врахуємо, що максимум вихідного логарифма буде визначатися мінімумом цього ж логарифма, але зі знаком «-», що відповідає умові

$$\sup \left\{ \ln F(\bar{X} / \Theta_k) \right\} = \inf \left\{ \ln F^{-1}(\bar{X} / \Theta_k) \right\}. \quad (2)$$

Максимум  $\ln F(\bar{X} / \Theta_k)$  еквівалентний за визначенням мінімуму

$$\ln F^{-1}(\bar{X} / \Theta_k) = \rho \cdot \ln(2\pi) / 2 + \sum_{i=1}^p \ln \sigma_i^{(k)} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^{(k)}}{\sigma_i^{(k)}} \right)^2 \quad (3)$$

Останній доданок правої частини виразу (3) є лінійною функцією геометричної відстані між двома точками в  $p$ -вимірному просторі інформативних ознак. Перша точка відноситься до ідентифікованого об'єкту, а друга – до нормованого (по дисперсії) центру точок, що належать до класу з номером  $k$ . Можна показати [10], що така відстань еквівалентна міжфункціональній відстані  $\rho_L(\cdot)$  для порівнюваних поліноміальних функцій, значення яких нормовані по дисперсіях.

**3. Синтез структурної моделі процедури ідентифікації діабетичних порушень** Використовуючи математичну модель (6), можна побудувати структурну модель процедури ідентифікації номера  $k$  параметричної моделі динаміки глікемії за результатами вимірювання  $p$  інформативних ознак  $x_1, \dots, x_p$ , рис. 1, який показує, що структура процедури може бути адаптована для будь-якого числа  $m$  ідентифікованих біологічних станів ( $m \geq 2$ ). Допускається і адаптація до числа  $p$  використовуваних інформативних ознак. Експериментальна перевірка можливостей розробленої структурної схеми для ідентифікації діабетичних станів, що використовуються в лікарській практиці і клінічних дослідженнях, показала, що показники ефективності існуючих глюкозотолерантних тестів істотно розрізняються. Оцінки ризиків і достовірності результатів ідентифікації для 3-х порівнюваних тестів представлені в табл. 1.

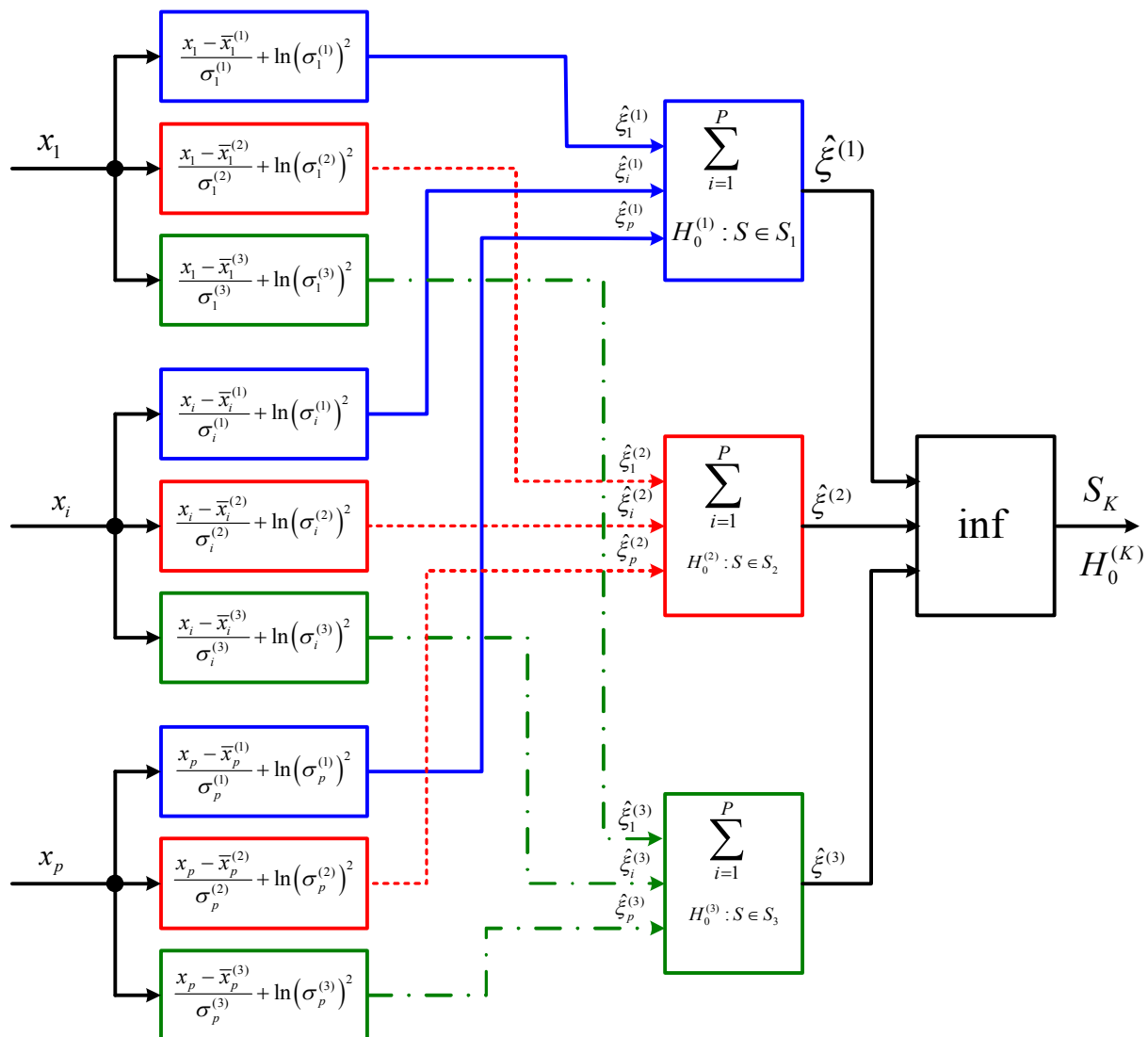


Рис. 1. Структурна схема процедури ідентифікації моделі динаміки глікемії

**Висновки**

1. Розроблено блок-схему з адаптивною (по відношенню до кількості ідентифікованих глікемічних моделей) структурою і відповідна їй комп'юте-

ризована система багатосторонньої ідентифікації моделей динаміки глікемії за двома глюкозотолерантними тестами. Збережена можливість ідентифікації глікемічних моделей для розширеної (більше 2-х) кількості тестів при необхідності підвищення досто-

вірності ідентифікації за умови збереження мінімально допустимого значення ризику 2-го роду.

Таблиця 1 – Показники ефективності глюкозотолерантних тестів

Ризики і достовірності	Метод тестування		
	Стандарт	Вдосконалений	Розроблений
Ризик 1-го роду	0	0	0,026
Ризик 2-го роду	0,091	0,409	0,045
Середній ризик	0,033	0,15	0,033
Достовірність	0,967	0,85	0,967

Розрахунок достовірності в табл. 1 проводиться для апіорних ймовірностей

$$q_1 = 0,633 \quad \text{і} \quad q_2 = 0,367.$$

2. Доведено можливість підвищення достовірності діагностики при використанні запропонованого методу, у порівнянні зі стандартним від значення 0,972 до 0,974 (обсяг навчальної вибірки  $N = 60$ ), причому останню достовірність теоретично можна підвищити до значення 0,979, якщо обсяг навчальної вибірки буде збільшуватися (що обумовлено потенційним зменшенням ризику другого роду  $\beta$ ).

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Сахарный диабет: Доклад исследовательской группы. сер. техн. докл. ВОЗ. М. Мед. 1987. 125 с.
- Лапта С.С. Методы повышения диагностической эффективности глюкозотолерантных тестов (на основе математического моделирования динамики гликемии): Дис. канд. техн. наук: 05.11.17 / ХНУРЕ. – Х., 2004. – 220 с.
- Сокол Є.І. Підвищення ефективності глюкозотолерантних тестів при використанні поліноміальних моделей динаміки глікемії / Є.І. Сокол, П.Ф. Щапов, О.В. Чмихова // Сучасні інформаційні системи. Т. 3, № 3. Харків, 2019. С. 138-141.
- Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2 / Б.Р. Левин – М.: Сов. радио, 1975. – 392 с.
- Айвазян С.А. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
- Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П.Харт. – М.: Мир, 1976. – 512 с.
- Зыбов В.Н. Моделирование функции преобразования первичного преобразователя в задачах многофакторных измерений / В.Н. Зыбов // Измерительная техника. – 2006. - № 4. – С. 26-31.
- Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 520 с.
- Раудис Ш. Ограниченность выборки в задачах классификации / Ш. Раудис // Статистические проблемы управления. – Вильнюс. – 1976. – Вып. 18. – С. 1-185.
- Щапов П.Ф. Повышение достоверности контроля и диагностики объектов в условиях неопределённости: монография / П.Ф. Щапов, О.Г. Аврунин. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 191 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. Г. Е. Філатова,  
Національний технічний університет “ХПІ”, Харків  
Received (Надійшла) 10.10.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.10.2019

#### Параметрическая идентификация диабетических состояний при использовании полиномиальных моделей динамики гликемии

О. В. Чмыхова, П. Ф. Щапов, В. В. Куличенко, А. В. Горбулич

**Предмет исследования.** Элементы аналитического и структурного синтеза процедуры идентификации модели динамики гликемии по критерию максимального правдоподобия. **Цель работы.** Уменьшение рисков идентификации диабетических состояний при использовании полиномиальных моделей динамики гликемии. **Задание.** На основе результатов глюкозотолерантного тестирования исследовать возможности параметрического распознавания диабетических состояний, когда динамика уровня глюкозы аппроксимируется полиномиальной моделью любого порядка. Использовать аналитическое выражение для минимума среднего риска для структурного синтеза процедуры идентификации вида диабета. Подтвердить эффективность использования полученной структурной схемы процедуры идентификации модели динамики гликемии при глюкозотолерантном тестировании. **Выводы.** Разработана блок-схема с адаптивной (по отношению к количеству идентифицируемых гликемических моделей) структурой и соответствующая ей компьютеризованная система многосторонней идентификации моделей динамики гликемии по двум глюкозотолерантным тестам. Доказана возможность повышения достоверности диагностики при использовании предлагаемого метода, по сравнению со стандартным от значения 0,972 до 0,974 (объем обучающей выборки  $N=60$ ).

**Ключевые слова:** диабетическое состояние, динамика гликемии, параметрическая идентификация, полиномиальная модель, средний риск, алгоритм идентификации.

#### Parametric identification of diabetic conditions using polynomial glycemic dynamics models

O. Chmykhova, P. Shchapov, V. Kulichenko, A. Gorbulitch

**The subject.** Elements of analytical and structural synthesis of the procedure for identifying the glycemic dynamics model by the criterion of maximum likelihood. **Objective.** Reducing the risks of identifying diabetic conditions using polynomial glycemic dynamics models. **The task.** Based on the results of glucose tolerance testing, investigate the possibilities of parametric recognition of diabetic conditions when the dynamics of glucose levels are approximated by a polynomial model of any order. Use an analytical expression to minimize the average risk for structural synthesis of the type of diabetes identification procedure. Confirm the effectiveness of using the obtained structural diagram of the procedure for identifying the glycemic dynamics model during glucose tolerance testing. **Conclusions.** A block diagram has been developed with an adaptive (with respect to the number of identifiable glycemic models) structure and a corresponding computerized system for multilateral identification of glycemic dynamics models using two glucose tolerance tests. The possibility of increasing the reliability of diagnosis using the proposed method is proved, compared with the standard one from a value of 0,972 to 0,974 (training sample size  $N = 60$ ).

**Keywords:** diabetic state, glycemic dynamics, parametric identification, polynomial model, medium risk, identification algorithm.

M. Yakovliev, K. Filonenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

## EFFECTS OF LOADING SPEED ON THE SITE TRAFFIC CONVERSION

The **subject** of this article is the impact of site loading speed to increase user conversions. The **goal** is to determine what is the optimal site loading speed for users and further site optimization. Tasks: identify and optimize the components that take the longest load time. The **methods** used are: optimization of the server part of the site; Configuring Apache and Nginx Server Using server side gzip compression Using CDNs to download popular JavaScript libraries server-side caching settings; database optimization; optimization of TCP, TLS, HTTP / 2; client side optimization. The following **results** are obtained. Using the methods described above, on the example of a working draft, it was possible to optimize the site loading speed by 40%. Taking statistics for the period of 7 days, with the same amount of traffic, the conversion of users to customers increased from 7% to 15%. The number of failures on the first visit to the site decreased by 30%. **Conclusions.** In the course of work, the correlation between the speed of loading the site and the conversion of users to customers was confirmed. By optimizing the speed of loading the site, it was possible to increase the conversion of users by 2 times and reduce the percentage of failure on the first visit to the site.

**Keywords:** user conversion, failure percentage, optimization, server part, client part.

### Introduction

Download speed is one of the key parameters that influence the failure rate and the conversion of users. An example of this is typical behavior when visiting the site. If a user navigates to a page and is forced to wait a long time to obtain the necessary information, it is likely to leave the page and go to a site that immediately provide him with the necessary information.

The most relevant download speed for commercial sites. Particularly acute this option if the site is promoted with the help of contextual advertising in search engines. Based on research and personal experience, identifies the following user behavior: 1) the user enters a query into the Google search box; 2) the user receives the search results; first 3-5 results of issue advertising and appropriately marked marker; 3) user opens new tabs in the first few sites from search results; 4) the user starts alternately studying the open pages.

In this context, if your site will be a long time to boot, the user can quickly move to the next site, rather than expect your download. Of particular relevance is the download speed on mobile devices. Mobile Internet is not stable fast download speeds, as well as the context and the user environment is not conducive to a measured information search. If you want to get information on the go, in a hurry with low internet speed, the speed of page loading is important.

### Research results

**1. Site speed for business.** It's no secret that the current business to a greater extent now depends on the promotion of their services on the Internet. Site as one of the tools to promote their brand and services must comply with many criteria to meet the user's expectations. These criteria include: UX, information architecture, offers relevant, marketing content and other component. The first with a user faces - how quickly he can get to the information on your site. The average conversion into the desired action is 1/10. In other words, 10 out of 100 people visiting your site likely to make a purchase or other desired effect. Due to low download speed you risk losing users at an early

stage - they visit your site. Suppose due to the long download speed instead of 100 users you passed 60. The average conversion of 60 people will have 6 members who have committed targeted action. If we translate this into the plane of money and income, we assume that each user brings you 50 USD. We get the following: 100 users - 10 to make a purchase -  $10 * 50 = 500$  USD; 60 members - 6 to make a purchase -  $6 * 50 = 300$  USD. Just because you download speeds as an entrepreneur may lose 40% of the income in this case.

**2. Exceptions.** The exception to this rule are the large and popular resources such as Facebook, OLX, Rozetka and so on. This phenomenon is due to the fact that the user's motivation and desire to get content higher than the irritation of waiting time. The benefits of waiting only works if your service is quite well known, and helps the user to solve his problem. The user knows in advance what to expect from life and what he'll get. Instead, he is willing to expectations.

**3. Research.** Large companies, including Google, conducted numerous studies on the impact of download speed. The following describes the results of these studies [1-6].

**3.1. Google:** "If the site is loaded for more than three seconds, 53% of users leave it" [1]. Download speed - an important parameter. To check the speed of the download, you can use the service from Google - Test My Site [2].

**3.2. SOASTA:** "Every second mobile page conversion delay reduces by 20%". According to the results of a joint study of the analytical agency SOASTA conversion depends on how fast the user is the target site. So, those pages that often led to conversion, were on average 26% faster than the others.

**3.3. Google:** "The mobile page, which has decreased the rate of 1 to 10 seconds, the failure rate increased by 123%". The largest gap in conversion is observed in the range of 2-5 seconds. According to studies, the conversion drops to 9 times.

**3.4. Google:** "Slow download speed - a negative ranking factor in Google». One of the principles of ranking in Google SERP - Mobile First Index. This principle works as follows: if the site is slow and not

optimized mobile version, the desktop and in issuing it, too, will pessimizirovan (i.e. goes down).

**3.5. Google:** "Slow download speed is the most irritating factor for mobile users". According to a survey conducted by Google in 2015, the year she went around advertising unplayable video and redirects to the main page. It is important to note that this refers exclusively to mobile users - but they are the most active internet audience in the last few years.

**3.6. Search Engine Land:** "The most popular websites with heavy traffic does not meet Google's criteria". Analytical site Search Engine Land conducted its own study, which analyzed the 1000 most popular websites with high traffic. He tested each through service Page Speed Insight and got some interesting results. It was found that only 2% of mobile sites received 100 out of 100 points. On the desktop the percentage has not changed much: only 4% exceed level of 90 points. The average stayed near 55 points, and the average speed of the page - 11 seconds. This casts doubt on the idea that 53% of users leave a site that loads more than three seconds.

**3.7. Google:** "Index loading speed affects the issue of less than 1% Google search results". Google acknowledges in its official blog. It also confirms that the chase too high download speed does not make sense.

**3.8. User Interface Engineering:** "If users complain about download speed, then in fact the problem lies elsewhere". It is to this paradoxical conclusion reached by researchers from the User Interface Engineering website. They found that there was no correlation between the actual speed of the download site and how it is perceived by users. As it turned out, if the site does not meet their needs if they can not find in it what they are looking for, they will perceive the session as a waste of time. A download speed will seem to them more slowly than it actually is.

**3.9. WP Faster:** "The download speed is not one of the eight main indicators of the effectiveness of the site". Many web developers are engaged in site optimization, do not focus on speed, and comfortable user experience.

**3.10. Total.** Based on the above studies, we can draw the following conclusions:

- Google engineers found that the user notices even the trifling delay loading - 0.4 seconds;
- Users are more likely to leave the page, if that is loaded 3+ seconds;
- Mobile users are willing to wait a little longer - 6-10 seconds;
- 79% of users of online stores do not re-buy if the first time the site was loaded for a long time.

What download speed performance necessary to be guided?

- 1 second - great but elusive results.
- 2-3 seconds - the standard response time most successful resources.
- 3-5 seconds - a small, but for some tolerant rate of projects;
- 6-10 seconds - so low rate of negative impact on the promotion;
- 11 seconds - a lamentable result that urgently needs to speed up the site.

#### 4. From what download speeds depend on?

Download speed can be divided into server and client side. It is these two components subsequently fall under optimization. Full load cycle on the first visit as follows:

- DNS-query on the name of the resource.
- Connecting to the server by IP-address.
- Installation secure connection when using HTTPS.
- Query HTML-pages on the url and wait response from the server.
- Loading HTML.
- Parsing file on the browser side, the creation of the request queue.
- Download and analysis of CSS-styles.
- Download and run JS-code.
- Top of the page rendering, execution of JavaScript (JS).
- Download web-fonts.
- Uploading images and other media.
- End drawing, work deferred JS-code.

The individual steps may be reversed or performed in parallel, but the essence remains unchanged.

Items from the first to the fourth refer to the server optimization, the rest - to the client.

#### 5. Tools for monitoring the speed of loading [6].

**5.1. Google PageSpeed Insights.** Convenient analyzer from Google for a quick assessment of client optimization. PageSpeed lets you know the speed and level of optimization for computers and mobile devices. Site speed is determined by two metrics: FCP and DCL.

**5.2. Pingdom.** Service to calculate the average load time and the number of calls to the server. Service details displays important information about the speed of images, styles, JavaScript, scripts and other page elements - allows you to immediately detect problem areas that hinder your site, and get tips on how to improve them.

**5.3. Google Analytics Report.** Reports Google analytics allow us to get a full range of data on your resource. Including performance reports until each page and the session. The result is a general summary of the average speed of response from the server, domain lookup, forwarding, and page load.

**5.4. GTmetrix.** Service testing resource productivity by providing a lot of useful information. Thanks to the preservation of the history of this service makes it possible to compare how deteriorated or improved speed after making edits..

**5.4. PR-CY.** The service allows the project to evaluate the performance of your phone and computer. In addition, the service provides detailed information to help in optimization.

#### 6. Accelerating the speed of loading site [5–9].

- 6.1. The server part.
- 6.2. Improving hosting.
- 6.3. Configure Nginx server.
- 6.4. Removing unused nginx-modules.
- 6.5. Working with the Server section.
- 6.6. Data compression.
- 6.7. Caching static files.
- 6.8. Apache server configuration.
- 6.9. Gzip - compress on the server side.
- 6.10. CDN to load popular JavaScript libraries.

- 6.12. Configuring server-side caching.
- 6.13. Database optimization.
- 6.14. Optimization of TCP, TLS, HTTP/2. I
- 6.15. Number of HTTP-requests.
- 6.16. Decrease redirects.
- 6.17. The client part.
- 6.18. Setting up an asynchronous download.
- 6.19. Remove extra plugins.
- 6.20. Optimize the page size.
- 6.21. Physical compression graphics.
- 6.22. Refusal to scale images.
- 6.23. Optimization of JavaScript and CSS.
- 6.24. Optimization of web fonts.
- 6.25. Setting up caching on the browser side.

## Conclusion

Taken together, the measures described above make it possible to get the most optimal download speed, thereby directly affecting the conversion and the number of users of your site. All the above measures have been imposed on the company website Geometrya.com.ua - online store mirrors. conversion growth figures do not take long to wait. Taking the statistics for the period - 7 days, for the same amount of traffic, conversion to purchase the site has grown from 7% to 15%. A number of failures at the first visit decreased by 30%. As a result of impact on the number of purchases and share profits.

## REFERENCES

1. *Research of influence of Google download speeds* (2019), available at: <https://www.thinkwithgoogle.com/consumer-insights/consumer-mobile-brand-content-interaction>
2. *A slow mobile site limits your business* (2019), available at: <https://www.thinkwithgoogle.com/intl/en-gb/feature/testmysite>
3. Daniel, An (2018), *The study Find out how you stack up to new industry benchmarks for mobile page speed*, available at: <https://www.thinkwithgoogle.com/marketing-resources/data-measurement/mobile-page-speed-new-industry-benchmarks/>
4. Mary Chen M. (2015), *Study loading speed as the irritation factor*, available at: <https://webmasters.googleblog.com/2015/04/mobilemadness-campaign-to-help-you-go.html>
5. Meunier B. (2017), *The study sites with low download speeds*, available at: <https://searchengineland.com/mobile-page-speed-important-not-yet-seo-270474>
6. Seruy A. (2017), *Influence indicator loading speed on the search results*, available at: <https://ain.ua/2017/04/13/tak-li-vazhna-skorost-zagruzki-sajta-ili-o-polze-google-pagespeed-insights/>
7. Perfetti C. (2018), *The Truth About Download Time*, available at: [https://articles.ue.com/download\\_time/](https://articles.ue.com/download_time/)
8. *The truth about how important download speed* (2018), available at: <https://vc.ru/flood/34484-pravda-o-tom-naskolko-vazhna-skorost-zagruzki-sayta>
9. Andrusenko A. (2018), *How to increase download speed?*, available at: <https://livepage.pro/knowledge-base/kak-uvlechit-skorost-zagruzki-sajta.html>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К. С. Козелкова,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 11.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

## Вплив швидкості завантаження сайтів на конверсію трафіку

М. В. Яковлев, К. Д. Філоненко

**Предметом** вивчення є вплив швидкості завантаження сайтів для збільшення конверсії користувачів. **Метою** є визначення оптимальної швидкості завантаження сайту для користувачів і подальша оптимізація сайту. **Завдання:** визначити та оптимізувати компоненти, які займають найбільше часу завантаження. Використовуваними **методами** є: оптимізація серверної частини сайту; налаштування сервера Apache і Ngix; використання Gzip стиснення на стороні сервера; використання CDN для завантаження популярних JavaScript бібліотек; настройка кешування на стороні сервера; оптимізація бази даних; оптимізація TCP, TLS, HTTP / 2; оптимізація клієнтської частини. Отримані такі **результати**. На прикладі робочого проекту, вдалося оптимізувати швидкість завантаження сайту на 40%. Взяті статистику за період - 7 днів, при тій же кількості трафіку, конверсія користувачів в покупців зростає з 7 до 15%. Кількість відмов при першому відвідуванні сайту знизилася на 30%. **Висновки**. В ході роботи підтверджена кореляція між швидкістю завантаження сайту і конверсією користувачів в покупців. Оптимізувавши швидкість завантаження сайту, вдалося в 2 рази збільшити конверсію користувачів і зменшити відсоток відмови при першому відвідуванні сайту.

**Ключові слова:** конверсія користувачів, відсоток відмови, оптимізація, серверна частина, клієнтська частина.

## Влияние скорости загрузки сайтов на конверсию трафика

М. В. Яковлев, К. Д. Філоненко

**Предмет** изучения – влияние скорости загрузки сайтов для увеличения конверсии пользователей. **Целью** является определение оптимальной скорости загрузки сайта для пользователей и дальнейшая оптимизация сайта. **Задачи:** определить и оптимизировать компоненты, которые занимают наибольшее время загрузки. Используемыми **методами** являются: оптимизация серверной части сайта; настройка сервера Apache и Ngix; использование Gzip сжатия на стороне сервера; использование CDN для загрузки популярных JavaScript библиотек; настройка кэширования на стороне сервера; оптимизация базы данных; оптимизация TCP, TLS, HTTP/2; оптимизация клиентской части. Получены следующие **результаты**. На примере рабочего проекта, удалось оптимизировать скорость загрузки сайта на 40%. Взяв статистику за период – 7 дней, при том же количестве трафика, конверсия пользователей в покупателей выросла с 7 до 15%. Количество отказов при первом посещении сайта снизилось на 30%. **Выводы**. В ходе работы подтверждена корреляция между скоростью загрузки сайта и конверсией пользователей в покупателей. Оптимизировав скорость загрузки сайта, удалось в 2 раза увеличить конверсию пользователей и уменьшить процент отказа при первом посещении сайта.

**Ключевые слова:** конверсия пользователей, процент отказа, оптимизация, серверная часть, клиентская часть.

О. А. Машков, Ю. В. Мамчур, С. В. Жукаускас, С. А. Нігородова

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ КОНЦЕПЦІЙ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ В МОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ РУХУ ПРИ ВИНИКНЕННІ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ

Запропоновано застосувати концепцію зворотних задач динаміки для створення системи керування мобільного комплексу екологічного моніторингу. Запропонований підхід доцільно використовувати при вирішенні завдання стабілізації руху в умовах нештатних ситуацій. Визначено, що формування системи керування на основі концепції зворотної задачі динаміки передбачає вирішення двох задач. По-перше це визначення керуючої сили для об'єкта керування. По-друге це визначення алгоритму керування силою. Отримано аналітичний вираз для вектору керуючої сили з урахуванням властивостей об'єкта керування, початкових умов, завданням програмної траєкторії руху. Надана аналітична оцінка якості процесу керування при нештатних ситуаціях з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки. Час перехідного процесу в системі керування оцінено для двох випадків, - як без зовнішніх збурень, так й при збудженні системи керування. Надані практичні рекомендації щодо побудови системи мобільного екологічного моніторингу.

**Ключові слова:** зворотна задача динаміки, перехідний процес, програмна траєкторія руху, система керування, час перехідного процесу, якість керування.

### Вступ

**Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Побудова алгоритмів керування рухом з застосуванням концепції зворотних задач динаміки здійснюється за двома етапами.

На першому етапі здійснюється безпосереднє формуванням вектору потрібної керуючої сили для керування динамічним об'єктом (розглядається мобільний комплекс екологічного моніторингу).

На другому етапі здійснюється обчислення значень елементів вектору керуючої функції, які забезпечують створення необхідної сили. Важлива особливість даного підходу полягає в тому, що для синтезу алгоритмів керування можуть використовуватися повні нелінійні рівняння руху без їх лінеаризації. Отримувані при цьому алгоритми так само є нелінійними. Їх структура адекватна структурі математичних моделей керованих процесів, а параметри алгоритмів визначаються параметрами математичних моделей призначених траєкторією руху.

**Аналіз останніх публікацій за проблематикою та визначення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Викладається методика синтезу функціонально-стійких систем керування програмним рухом, яка базується на ідеях методу, розробленого Петровим Б.М., Поповим Е.П., Крутько П.Д., а також методу, розробленого Тимофєєвим А.В. В роботах Барбашина Е.А. розглянуто питання наближення здійснення руху динамічного об'єкту по заданій траєкторії [1]. Дослідженню побудови алгоритмів керування як зворотної задачі динаміки присвятили свої праці Петров Б.Н., Крутько П.Д., Попов Е.П. [2-5]. Методи рішення зворотних задач запропоновано Галиулліним А.С. [6]. Синтезу алго-

ритмів керування польотом літального апарата на основі рішення зворотних задач динаміки присвячені праці Артюшина Л.М., Машкова О.А., Панова В.І., Шамова Г.В. [7-28].

**Метою статті** є розкриття особливостей застосування концепції зворотних задач динаміки в мобільних комплексах екологічного моніторингу для стабілізації руху при виникненні нештатних ситуацій.

### Виклад основного матеріалу дослідження

**1. Визначення керуючої сили для об'єкта керування.** Допускаємо, що стан руху мобільного комплексу екологічного моніторингу описується вектор-функцією  $X(t) = [X_1(t), \dots, X_n(t)]$ . Компоненти  $X_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  створюють фазові координати у  $n$ -вимірному евклідовому просторі  $R^n$ .

Динаміка руху мобільного комплексу екологічного моніторингу в часі  $t$  описується матричним диференціальним рівнянням

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F[X(t), U(t), Z(t)] + P(t); \\ X(t_0) &= X_0, \quad t \in [t_0, t_T], \end{aligned} \quad (1)$$

де  $X$  –  $n$ -вимірний вектор фазових координат;  $U(t)$  –  $m$ -вимірний вектор керуючих впливів;  $Z(t)$  –  $r$ -вимірний вектор параметрів об'єкта;  $P(t)$  –  $n$ -вимірний вектор зовнішніх збурень;  $X_0$  – початковий стан;  $T = t_T - t_0$  – час руху об'єкта. На керування і стан об'єкта задані обмеження  $X(t) \in Q_X$ ;  $U(t) \in Q_U$ . На інтервалах часу  $[t_0, t_T]$  функція керування  $U(t)$  кусочно-неперервна і може в ізольованих точках мати розриви першого роду.

Метою керування є забезпечення руху об'єкта за заданою штатною траєкторією руху шляхом від-

повідного вибору  $U(t) \in Q_u$ . Під програмою руху об'єкта розуміємо бажаний закон зміни в часі стану  $X(t)$ , що заздалегідь володіє запропонованими властивостями (рух за відсутності відмов). Якщо цей закон є вирішенням рівняння (1) при деякому допустимому  $U(t) \in Q_u$ , називатимемо його програмним рухом і позначати  $X_n(t)$ ,  $t \in [t_0, t_T]$ .

Допустиме керування, що породжує  $X_n(t)$  буде-мо називати програмним керуванням  $U_n(t)$ .

Дана задача сформульована Е.А.Барбашиним [1] і названа задачею здійснення заданої траєкторії. Програмний рух можна побудувати виходячи з різних міркувань. Програмне керування  $U_n(t)$  і породжуване ним  $X_n(t)$  називатимемо оптимальними і позначати відповідно  $U_n^0(t)$ ,  $X_n^0(t)$  якщо вони доставляють мінімум заданому функціоналу якості

$$J[U_n^0(\cdot), X_n^0(\cdot)] = \min J[U_n(\cdot), X_n(\cdot)].$$

Залежно від умов функціонування об'єкта і вимог, що пред'являються до системи керування, можна виділити три основні задачі:

- задача стабілізації програмного руху;
- задача термінального керування;
- задача адаптивного стеження.

Для розгляду особливостей застосування методу зворотних задач динаміки для багатовимірного об'єкта рівняння (1), представимо в операторній формі (без урахування зовнішніх збурень) [22]

$$A(p)X = B(p)U, \quad (2)$$

де

$$A(p) = \{a_{ij}(p)\}, \quad i, j = \overline{1, n},$$

$$X^T = [X_1 \dots X_n],$$

$$B(p) = \{b_{ij}(p)\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r},$$

$$U^T = [U_1 \dots U_r].$$

Відомо, що таке керування може бути представлене у формі Коші.

Побудуємо алгоритм керування при якому рух об'єкта з точки  $X(0)$  у початку координат здійснюється за траєкторією

$$X_n(t) = \begin{bmatrix} C_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{1k}e^{\lambda_k t} \\ C_{21}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{2k}e^{\lambda_k t} \\ \dots \\ C_{n1}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{nk}e^{\lambda_k t} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

або в матричній формі

$$X_n(t) = Ce^{\Lambda t},$$

де  $C = \{C_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k}$ ,

$$[e^{\Lambda t}]^T = [e^{\lambda_1 t} e^{\lambda_2 t} \dots e^{\lambda_k t}],$$

де  $\lambda_l$   $l = \overline{1, k}$  – різні дійсні або комплексно зв'язані числа, що задовольняють умові  $R e^{\lambda_l} < 0$ .

Постійні коефіцієнти  $C_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k}$  визначаються початковими значеннями фазових координат і їх  $(k-1)$  похідної.

За умови довільного чину у виборі прийнятних значень параметрів  $C_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k}$ ,  $\lambda_l$   $l = \overline{1, k}$  отримаємо різноманіття різних програмних рухів.

Застосування вибору довільним чином може бути використане для виділення тих програмних рухів  $X_n(t)$ , які є рішенням рівняння (2) і задовольняють різним обмеженням (наприклад, конструктивним обмеженням або обмеженням на безпеку руху)

$$X(0) = \begin{bmatrix} C_{11} + C_{12} + \dots + C_{1k} \\ C_{21} + C_{22} + \dots + C_{2k} \\ \dots \\ C_{n1} + C_{n2} + \dots + C_{nk} \end{bmatrix},$$

$$\dot{X}(0) = \begin{bmatrix} C_{11}\lambda_1 + C_{12}\lambda_2 + \dots + C_{1k}\lambda_k \\ C_{21}\lambda_1 + C_{22}\lambda_2 + \dots + C_{2k}\lambda_k \\ \dots \\ C_{n1}\lambda_1 + C_{n2}\lambda_2 + \dots + C_{nk}\lambda_k \end{bmatrix},$$

$$X^{(k-1)}(0) = \begin{bmatrix} C_{11}\lambda_1^{k-1} + C_{12}\lambda_2^{k-1} + \dots + C_{1k}\lambda_k^{k-1} \\ C_{21}\lambda_1^{k-1} + C_{22}\lambda_2^{k-1} + \dots + C_{2k}\lambda_k^{k-1} \\ \dots \\ C_{n1}\lambda_1^{k-1} + C_{n2}\lambda_2^{k-1} + \dots + C_{nk}\lambda_k^{k-1} \end{bmatrix},$$

Керуючу силу, що реалізовує траєкторію  $X_n(t)$  позначимо  $f_1[t]$ . Шукатимемо таку траєкторію у вигляді

$$f_n[t] = A(p) X_n(t). \quad (4)$$

Для отримання програмного закону зміни керуючої сили підставимо вираз (3) в (4).

$$f_n(t) = \begin{bmatrix} a_{11}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) + \dots + \\ \quad + a_{1n}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) \\ a_{21}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) + \dots + \\ \quad + a_{2n}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) \\ \dots \\ a_{n1}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) + \dots + \\ \quad + a_{nn}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) \end{bmatrix}.$$

Крім того, вважаємо, що

$$A(p) = \{a_{ij}(p)\} = \{m_{ij}p^2 + r_{ij}p + h_{ij}\}, \quad (5)$$

$i, j = \overline{1, n}$ .



З урахуванням виразу (5) у вираз керуючої сили в матричній формі

$$f_n[t] = (MC\Lambda_d^2 + RC\Lambda_d + HC)e^{\lambda t}, \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} M &= \{m_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, n}; \\ C &= \{c_{ij}\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k}; \\ \Lambda_d &= \text{diag}\{\lambda_i\}, \quad i = \overline{1, k}; \\ R &= \{r_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, n}; \\ [e^{\lambda t}]^T &= \{e^{\lambda_i t}\}, \quad i = \overline{1, k}. \end{aligned}$$

Для того, щоб траєкторія  $X_n(t)$  починалася в такій точці:

$$X_n(0) = \begin{bmatrix} X_{10} & \dot{X}_{10} & \ddot{X}_{10} \dots X_{10}^{(k-1)} \\ X_{20} & \dot{X}_{20} & \ddot{X}_{20} \dots X_{20}^{(k-1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{n0} & \dot{X}_{n0} & \ddot{X}_{n0} \dots X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix},$$

елементи матриці  $C = \{c_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k}$  треба визначити в результаті рішення  $n$  систем  $k$  алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} C_{11} + C_{12} + \dots + C_{1k} = X_{10}; \\ C_{11}\lambda_1 + C_{12}\lambda_2 + \dots + C_{1k}\lambda_k = \dot{X}_{10}; \\ \dots \\ C_{11}\lambda_1^{(k-1)} + C_{12}\lambda_2^{(k-1)} + \dots + C_{1k}\lambda_k^{(k-1)} = X_{10}^{(k-1)}; \\ \dots \\ C_{n1} + C_{n2} + \dots + C_{nk} = X_{n0}; \\ C_{n1}\lambda_1 + C_{n2}\lambda_2 + \dots + C_{nk}\lambda_k = \dot{X}_{n0}; \\ \dots \\ C_{n1}\lambda_1^{(k-1)} + C_{n2}\lambda_2^{(k-1)} + \dots + C_{nk}\lambda_k^{(k-1)} = X_{n0}^{(k-1)} \end{cases}$$

або в матричній формі

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \dots \\ C_{1k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{10} \\ \dot{X}_{10} \\ \dots \\ X_{10}^{(k-1)} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_{n1} \\ C_{n2} \\ \dots \\ C_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{n0} \\ \dot{X}_{n0} \\ \dots \\ X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix}.$$

Рішення цих матричних рівнянь має вигляд:

$$[C_{11} \dots C_{1k}]^T = \Phi^{-1} [X_{10} \dot{X}_{10} \dots X_{10}^{(k-1)}]^T, \quad (7)$$

$$[C_{n1} \dots C_{nk}]^T = \Phi^{-1} [X_{n0} \dot{X}_{n0} \dots X_{n0}^{(k-1)}]^T, \quad (8)$$

де

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Слід врахувати, що  $\Delta = \|\Phi\|$  є визначником Вандермонда, який можна записати у вигляді

$$\prod_{1 \leq i < j \leq k} (\lambda_j - \lambda_i)$$

Цей визначник може дорівнювати нулю лише у тому випадку, коли  $\lambda_j = \lambda_i$   $j \neq i$ .

Оскільки величини  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, k}$  вибрані різними, то в нашому випадку визначник Вандермонда не дорівнює нулю, і, отже існує зворотна матриця  $\Phi^{-1}$ .

Підставивши вираз (9) у вирази (7), (8) знаходимо

$$\begin{aligned} C &= \begin{bmatrix} X_{10} & \dot{X}_{10} & \dots & X_{10}^{(k-1)} \\ X_{20} & \dot{X}_{20} & \dots & X_{20}^{(k-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n0} & \dot{X}_{n0} & \dots & X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix} = \\ &= \Phi^{-1} = X(0)\Phi^{-1T}. \end{aligned} \quad (10)$$

Вираз для вектору керуючої сили може бути знайдений шляхом підстановки виразу (10) у вираз (6). Маємо:

$$\begin{aligned} f_n[t] &= \left\{ M \left( X(0) [\Phi^{-1}]^T \right) \Lambda_d^2 + \right. \\ &+ R \left( X(0) [\Phi^{-1}]^T \right) \Lambda_d + \\ &\left. + H \left( X(0) [\Phi^{-1}]^T \right) \right\} e^{\lambda t}. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналізуючи отриманий вираз (11) визначаємо, що для отримання потрібної керуючої сили [22] необхідно заздалегідь:

- описати об'єкт керування, шляхом задання елементів матриць  $M$ ,  $R$ ,  $H$ ;
- задати початкові умови по кожній керованій координаті і їх перших  $(k-1)$  похідних;
- задати програмну траєкторію руху, шляхом відповідного вибору елементів  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

Відшукування виразу для керуючої сили закінчується першим етапом вирішення поставленої задачі.

**2. Визначення алгоритму керування силою.** Розглянемо тепер наступний етап, пов'язаний з реалізацією програми зміни сили.

Задача практичної реалізації алгоритму керування силою  $f_n$  полягає у визначенні вектора керу-

ючих функцій  $U_n$  тобто величин відхилень органів керування за допомогою яких створюється сила  $f_n[X_n, U_n]$ . Вирішення цієї задачі визначається структурою і параметрами об'єкта керування і вимірюваною інформацією.

Вважаємо, при цьому, що об'єкт керування (1) володіє властивостями керованості, сила  $f_n$  однозначно визначається величиною вектора керування  $U^T = (U_1 \dots U_r)$ . Тому, для кожного моменту часу  $t$  і відповідного йому стану  $X(t)$  можна вказати таке  $U_n(t)$  при якому

$$f(X, U_n) = f_n[t]. \quad (12)$$

Керування (12) може бути вирішене відносно  $U_n$  таким чином:

аналітично (окремий випадок),  
алгоритмічно (найбільш загальний випадок).

Розглянемо другий шлях вирішення рівняння (12), який представляє найбільший інтерес з погляду практичної реалізації.

Нехай  $f(X, U)$  така, що

$$U_i \cdot f(X, U_i, U_j) > 0,$$

$$U_j = \text{const}; \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i \neq j.$$

Шукатимемо вирішення рівняння (12) у такому вигляді:

$$\dot{U}_n = \rho \Delta f(t), \quad (13)$$

де

$$\rho^T = \text{diag}(\rho_1, \dots, \rho_r),$$

$$\Delta f(t) = f_n(t) - f(X, U).$$

Такий підхід до визначення керуючих функцій базується на результатах досліджень [12-28].

Вибір алгоритму (13) визначається в першу чергу властивостями функцій  $f(X, U)$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = U_n(t).$$

Структурно алгоритм (13) може бути представлений у вигляді замкнутої системи стеження системи, схема якої приведена на рис. 1.

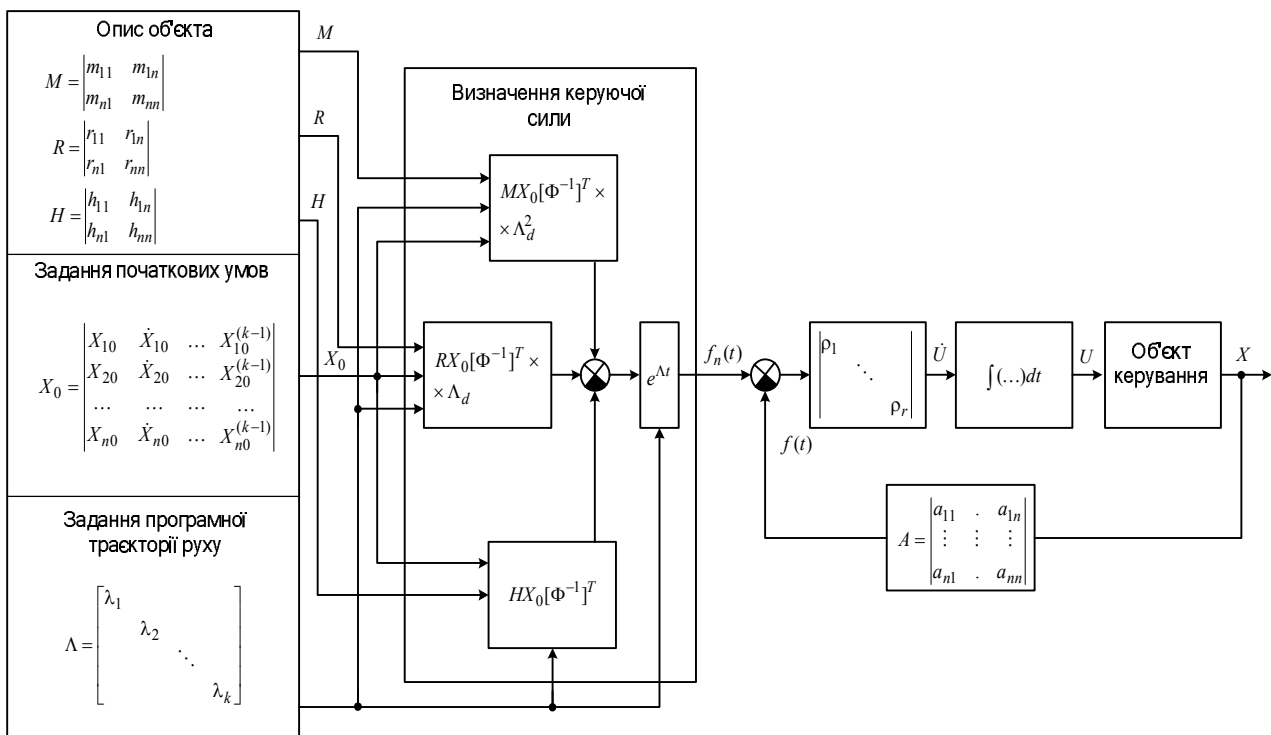


Рис. 1. Структурна схема алгоритму керування по методу зворотних задач динаміки

Ця схема відповідає алгоритмічному вирішенню рівняння

$$f(X, U) = f_n(t),$$

програмне значення керуючої сили визначається співвідношенням (11).

Слід враховувати, що навіть якщо програмне керування як функція часу побудоване, практична користь від його застосування невелика: різного роду збурення, а також невизначеність властивостей і умов функціонування об'єкта у тому числі і при

нештатних ситуаціях завадять реалізації програмного руху  $X_n(t)$  при використанні  $U_n(t)$ .

Так, якщо в об'єкті (1) керованому за заздалегідь певною програмою  $U_n(t)$  виникнуть в деякий момент  $t = t(\cdot)$  непередбачені збурення  $\Delta X(t(\cdot))$  вектору стану  $X(t)$ , то задане незмінне при  $t > t(\cdot)$  програмне керування  $U_n(t)$  "поведе" об'єкт, починаючи з моменту  $t = t(\cdot)$  в стан  $X(t_T)$ , взагалі кажучи, відмінне (і, можливо, дуже суттєво) від за-

пропонованого стану  $X_n(t_T)$ . У цьому випадку керування повинно формуватися з урахуванням додаткової інформації, що надходить в систему керування в процесі руху.

Цій вимозі відповідає керування зі зворотним зв'язком.

Алгоритм керування із зворотним зв'язком може бути отриманий за допомогою виразу (6). Представимо програмний рух у вигляді

$$X_n(t) = Ce^{\Lambda t},$$

де  $C = \{c_{ij}\}$ ,  $ij = \overline{1, n}$  – квадратна матриця розмірності  $n \times n$ .

Слід зазначити, що у даному випадку матриця  $C$  видозмінена в порівнянні з виразом (3) – зведена до квадратної. При умові виконання рівності

$$X(t) = X_n(t)$$

маємо  $X(t) = Ce^{\Lambda t}$ .

Звідки  $e^{\Lambda t} = e^{-1} X(t)$ ,  $\det C \neq 0$ . (14)

Тоді закон керування силою (3) з урахуванням виразу (14) може бути представлений у вигляді

$$f_n[X(t)] = (M\Lambda^2 + R\Lambda + HC) [C^{-1} X(t)]. \quad (15)$$

У кожен момент часу  $f_n(t)$  формується за вимірюваннями поточного стану системи, тобто на основі зворотного зв'язку.

Характерним при цьому є те, що коефіцієнти алгоритму керування силою визначаються початковими умовами (1)

Структурна схема системи керування, побудованого відповідно до (15), приведена на рис. 2.

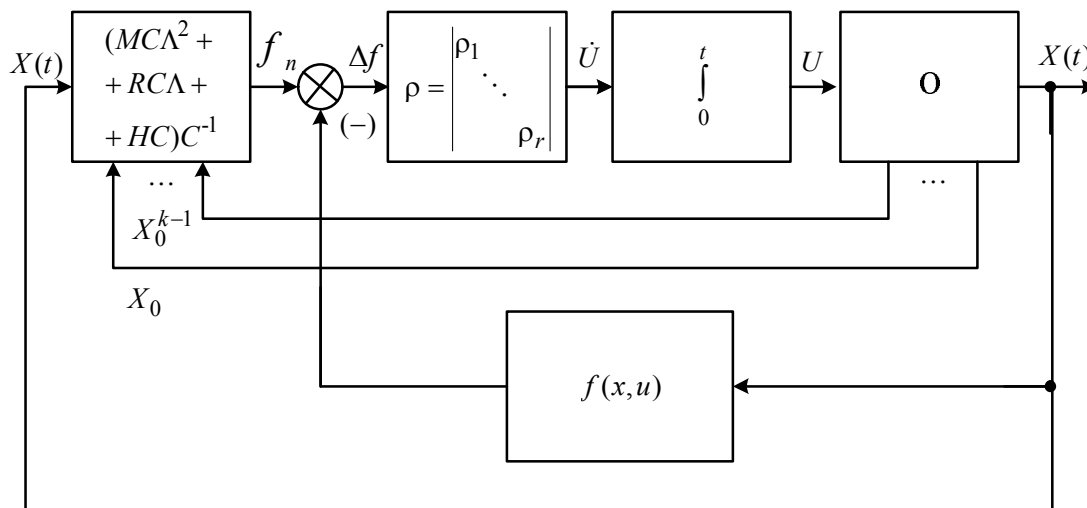


Рис. 2. Структурна схема системи керування по методу зворотних задач динаміки

**3. Оцінка якості процесу керування при нештатних ситуаціях з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки.** Оцінимо стійкість і максимальний час перехідного процесу в автоматичній системі при нештатних ситуаціях з алгоритмом керування на основі вирішення зворотних задач динаміки в умовах коли початкові збурення і постійно діючі зовнішні збурення обумовлені обмеженнями вигляду [22]

$$\begin{aligned} \|X(t_0) - X_n(t_0)\| &< \delta_0; \\ \|P(t)\| &< C_p, \end{aligned}$$

де  $\delta_0, C_p$  – деякі позитивні параметри.

Вважаємо, що існує така Гурвіцева матриця  $\Gamma$  з простими власними числами  $\gamma_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  – коренями характеристичного рівняння системи

$$\dot{X} = \Gamma X, \quad X(t_0) = X_0,$$

яка задовольняє умові

$$(X, \dot{X}_n(t) + \Gamma(X - X_n(t))) \in R, \quad \forall t > t_0 \quad (16)$$

для будь-якого  $X \in R^n$ .

Покажемо, що закон керування

$$U(t, X) = U[X, \dot{X}_n + \Gamma(X - X_n), \Xi], \quad t \in [t, \infty],$$

забезпечує асимптотичну стійкість програмного руху  $X_n(t)$  в цілому, тобто будь-який збурений рух  $X(t)$  при будь-яких  $X(t_0) \in R$  асимптотично зближується з  $X_n(t)$ .

Слід зазначити, що відповідно до [1] програмний рух є асимптотично стійким в цілому якщо він асимптотично стійкий при початкових даних, які б великі вони не були.

З виразів (1), (16) знаходимо

$$F[X(t), U(t), \Xi] = \dot{X} = \dot{X}_n(t) + \Gamma(X - X_n(t)),$$

звідки безпосередньо слідує

$$\dot{X} - \dot{X}_n(t) = \Gamma(X - X_n(t)). \quad (17)$$

При цьому слід враховувати, що за допомогою відповідного вибору матриці  $\Gamma$  можна забезпечити будь-який запропонований характер загасання пере-

хідного процесу в процесі керування. Насправді, якщо всі корені характеристичного рівняння системи (17) мають негативні дійсні частини, тобто

$$\operatorname{Re} \gamma_i < 0, \quad i = \overline{1, n},$$

то тривіальне рішення системи нестійке.

Оскільки по умові (16) матриця  $\Gamma$  вибрана з простими власними числами, то існують позитивні числа  $C$  і  $\gamma$  такі, що

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \gamma_i &< -\gamma, \\ \|X(t) - X_n(t)\| &< C \|X(t_0) - X_n(t_0)\| e^{-\gamma(t-t_0)}, \quad (18) \\ \forall t &> t_0. \end{aligned}$$

Звідки безпосередньо слідує асимптотична стійкість програмного руху в цілому.

Дамо оцінку максимального часу перехідного процесу

**Випадок 1.** Зовнішні впливи відсутні  $\pi(t) = 0$ .

Нехай потрібно синтезувати закон керування, що гарантує для будь-яких  $\xi \in \Xi$ ,  $\pi(t) \in Q_\pi$ ,  $\varepsilon$  – близькість реального і програмного рухів, починаючи з деякого кінцевого моменту часу  $t_n > t_0$ , тобто

$$\|X(t) - X_n(t)\| < \varepsilon \quad \forall t \geq t_n. \quad (19)$$

Вираз (19) з урахуванням виразу (18) може бути представлений у вигляді

$$C \|X(t_0) - X_n(t_0)\| e^{-\pi(t_n-t_0)} \leq \varepsilon,$$

звідки слідує

$$\gamma(t_n - t_0) \leq \ln \frac{C}{\varepsilon} \|X(t_0) - X_n(t_0)\|. \quad (20)$$

Позначимо  $T_n = t_n - t_0$  – час перехідного процесу в системі.

Час перехідного процесу  $T_n$  може бути оцінено за допомогою виразу (20)

$$T_n \leq \gamma^{-1} \ln \frac{C \|X(t_0) - X_n(t_0)\|}{\varepsilon}. \quad (21)$$

**Випадок 2.** Мають місце зовнішні збурення  $\pi(t) \neq 0$ .

Нехай об'єкт керування описується рівнянням

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F[X(t), U(t), \xi] + \pi(t), \\ X(t_0) &= X_0, \quad t \in [t_0, t_n]. \end{aligned}$$

Крім того

$$X \in Q_X,$$

$$\dot{X}_n(t) + \Gamma(X - X_n) \in Q_X.$$

Керування  $U$  вибрано у вигляді

$$\begin{aligned} U(t, X) &= U[X, \dot{X}_n + \Gamma(X - X_n), \xi], \\ t &\in [t_0, \infty). \end{aligned}$$

Рівняння замкнутої системи має вигляд

$$\dot{X}(t) - \dot{X}_n(t) = \Gamma[X(t) - X_n(t)] + \pi(t).$$

Припустимо, що  $X_n(t)$  і  $\dot{X}_n(t)$  лежать на множинах  $Q_X$  і  $Q_{\dot{X}}$  із запасами відповідно  $\delta_1$  і  $\delta_2$ , причому

$$\begin{aligned} \delta_1 &> C \|X_0 - X_n(t_0)\|, \\ \delta_2 &> C \|X_0 - X_n(t_0)\| \cdot \|\Gamma\| \end{aligned}$$

або з урахуванням  $\|\Gamma\| \neq 0$

$$\begin{aligned} \delta_1 - C \|X_0 - X_n(t_0)\| &> 0, \\ \delta_2 \|\Gamma\|^{-1} - C \|X_0 - X_n(t_0)\| &> 0. \end{aligned}$$

Введемо позначення

$$\begin{aligned} X &= \min \left[ \delta_1 - C \|X_0 - X_n(t_0)\|, \delta_2 \|\Gamma\|^{-1} - \right. \\ &\quad \left. - C \|X_0 - X_n(t_0)\| \right]; \\ C \gamma^{-1} C_\pi &< \min(x, \varepsilon), \\ \varepsilon &> \|X(t) - X_n(t)\|. \quad (22) \end{aligned}$$

З урахуванням прийнятих позначень може бути отримана така умова

$$\begin{aligned} \|X(t) - X_n(t)\| &\leq \\ &\leq \|e^{\gamma(t-t_0)}\| \cdot \|X_0 - X_n(t_0)\| + C \gamma^{-1} C_\pi. \end{aligned}$$

Звідки з урахуванням (21) слідує

$$C \|X_0 - X_n(t_0)\| e^{-\gamma(t-t_0)} + C \gamma^{-1} C_\pi < \varepsilon.$$

Вирішуючи отриману нерівність відносно  $t = t_n$  знаходимо

$$\begin{aligned} \varepsilon - C \gamma^{-1} C_\pi &> C \|X_0 - X_n(t_0)\| e^{-\gamma(t_n-t_0)}, \\ t_n &\leq t_0 + \gamma^{-1} \ln \frac{C \|X_0 - X_n(t_0)\|}{\varepsilon - C \gamma^{-1} C_\pi}. \end{aligned}$$

Час перехідного процесу

$$T_n \leq \gamma^{-1} \ln \frac{C \|X_0 - X_n(t_0)\|}{\varepsilon - C \gamma^{-1} C_\pi}. \quad (23)$$

Порівнюючи вираз (23) з виразом (21) можна зробити висновок про те, що за наявності зовнішніх збурень час перехідного процесу збільшується таким чином:

$$\begin{aligned} T_n(C_\pi \neq 0) &= \\ &= T_n(C_\pi = 0) + \gamma^{-1} \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon - C \gamma^{-1} C_\pi}. \end{aligned}$$

При великих збуреннях (збільшення  $C_\pi$ ) значно зростає час перехідного процесу.

Для зменшення часу перехідного процесу в системі необхідно збільшувати  $\gamma$  шляхом відповідного вибору керування.

## Висновки

Запропоновано технологію управління для дистанційно пілотованого літального апарату у випадку коли структура алгоритму керування не містить в явному вигляді рівняння руху об'єкта.

Запропонований підхід до конструювання алгоритмів керування дозволяє отримувати алгоритми без використання детальних рівнянь керованого процесу.

При цьому досить використовувати в якості математичної моделі узагальнені рівняння, що відтворюють фундаментальні закони руху.

Для синтезу алгоритмів керування дистанційно пілотованих літальних апаратів можуть використовуватися повні нелінійні рівняння руху без їх лінеаризації. Отримувані при цьому алгоритми також є нелінійними.

Їх структура адекватна структурі математичних моделей керованих процесів, а параметри алгоритмів визначаються параметрами математичних моделей призначених траєкторій руху.

По суті, побудова алгоритмів керування рухом дистанційно пілотованих літальних апаратів по призначеній траєкторії має два аспекти.

Перший з них пов'язаний з безпосереднім формуванням вектору потрібної керуючої сили  $f^*[x]$ , а другий – з обчисленням значень елементів вектору керуючої функції  $U_n(t)$ , який створює необхідну силу  $f^*$ .

Розрахункові співвідношення, за допомогою яких обчислюються  $f^*$  і  $U_n(t)$  та складають зміст алгоритму керування рухом.

Оскільки керування рухом здійснюється за принципом керування силою, отриманий алгоритм керування є адаптивним, його динамічні властивості адекватні динамічним властивостям системи.

Коефіцієнти системи керування визначаються початковими параметрами руху об'єкта, а також параметрами заданої програмної траєкторії.

Це дозволяє змінювати параметри програмної траєкторії в процесі руху об'єкта.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барбашин Е.А. О приближении осуществления движения по заданной траектории / Автоматика и телемеханика, 1961, т. XX, №6, с. 681-687.
2. Петров Б.Н., Крутько П.Д., Попов Е.П. Построение алгоритмов управления как обратная задача динамики. Докл. АН СССР. Кибернетика и теория регулирования, 1979, т. 247, №5, с. 1078-1081.
3. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. М., Техническая кибернетика, №4, 1980, с. 147-156.
4. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М., Техническая кибернетика, №5, 1980, с. 149-167.
5. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Конструирование алгоритмов управления полетом на основе решения обратных задачи динамики. Продольное движение. М., Техническая кибернетика, №2, 1981, с. 162-170.
6. Галиуллин А.С. Методы решения обратных задач динамики. М.: Наука, 1986, 224 с.
7. Артюшин Л.М., Панов В.И., Шапов Г.В. Синтез алгоритмов управления полетом на основе решения обратных задач динамики. Киев : КВВАИУ, 1982, 44с.
8. Артюшин Л.М. Синтез алгоритмов управления движением сложных механических систем по методу обратных задач динамики. Докл. АН УССР. Кибернетика и вычислительная техника, 1986, №8, с.73-76.
9. Артюшин Л.М. Обратные задачи динамики и конструирование управлений конфигурацией механической системы. Докл. АН УССР. Механика, 1986, №7, с.27-30.
10. Артюшин Л.М. Оптимальное управление динамической системой на основе решения обратной задачи динамики. Докл. АН УССР. Кибернетика и вычислительная техника, 1987, № 7, с. 62-65.
11. Артюшин Л.М., Машков О.А., Дурняк Б.В., Сивов М.С. Теорія автоматичного керування. Львів, Вид. УАД, 2004.- 272.
12. Машков О.А., Зеянин Н.А. Некоторые особенности построения эвристических алгоритмов наблюдения на основе решения обратных задач динамики / Материалы XXIV военно-научной конференции училища. - К.:КВВАИУ, 1983 Ч.III, С.128-130.
13. Машков О.А., Вышкварок Л.С. Методика построения алгоритма стабилизации программного движения с заданным характером переходного процесса на основе решения обратной задачи динамики / Материалы XXV военно-научной конференции училища. - К.: КВВАИУ, 1985, Ч.3, С.59-61.
14. Машков О.А. Оценка устойчивости динамической системы с алгоритмом управления, полученным на основе решения обратных задач динамики / Отдельный тематический научно-технический сборник. К.:КВВАИУ, 1985, С. 62-64.
15. Машков О.А. Оценка времени переходного процесса в динамической системе с алгоритмом управления на основе решения обратных задач динамики / Отдельный тематический научно-технический сборник. К.:КВВАИУ, 1985, С. 65-67.
16. Машков О.А. Некоторые особенности синтеза системы автоматического управления полетом летательного аппарата на основе решения обратной задачи динамики / Отдельный тематический научно-технический сборник. К.:КВВАИУ, 1985, С. 49-51.
17. Машков О.А. Информационное обеспечение систем управления, построенных на основе решения обратных задач динамики / Материалы XXVI военно-научной конференции училища. – К. : КВВАИУ, 1986, Ч.III. С. 7-9.
18. Машков О.А., Перевозников А.Ю., Червяк О.Г. Исследование алгоритмов управления динамической системы на основе решения обратных задач динамики / Материалы XXVII военно-научной конференции училища. – К. : КВВАИУ, 1986, Ч.III. С. 109-113.

19. Машков О.А. Особенности применения метода обратных задач динамики для многомерных систем автоматического управления / Научно- методический сборник, Вып.1. Оборудование летательных аппаратов.- К.: КВВАИУ, 1987, С. 47-49.
20. Машков О.А. Адаптивное управление программным движением летательного аппарата с использованием алгоритмов на основе решения обратной задачи динамики / Материалы 1-ой научно-технической конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики”.-К.: КПИ, 1988, С.3.
21. Машков О.А., Кіріяк С.А. Структура адаптивной системы управления программным движением с алгоритмом на основе решения обратной задачи / Материалы ХХІХ военно-научной конф. – К.: КВВАИУ.–Ч.ІІІ, 1989,С.63-67.
22. Машков О.А. Синтез многомерных автоматических систем на основе решения обратных задач динамики. Киев.: КВВАИУ, 1989, 76 с.
23. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Аналитическая оценка качества процесса управления на тренажерах дистанционно пилотируемого летательного аппарата с алгоритмом на основе решения обратных задач динамики / Научно-технічний журнал: Аерокосмічні технології, - вип. 2(02), 2017 с. 59-62.
24. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Застосування концепції оберненої задачі динаміки для синтезу програмного керування рухом в імітаторі динаміки» польоту тренажера дистанційно пілотованого літального апарату / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2018. Вип. 82. – С. 154-166.
25. Машков О.А., Дурняк Б.В., Мамчур Ю.В., Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарату на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (детермінована постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2018. Вип. 82. – С. 166-176.
26. Машков О.А., Дурняк Б.В., Мамчур Ю.В., Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарату на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (стохастична постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2018. Вип. 83. – С. 146-153.
27. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Формалізація задачі підготовки на тренажері оператора керування безпілотним літальним апаратом екологічного моніторингу на основі вирішення зворотних задач динаміки / Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу “Університет новітніх технологій”. - К.: ПВНЗ “Університет новітніх технологій”, 2018. - Випуск 2(6), с. 24-30.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Барабаш,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 27.05.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.09.2019

#### Применение концепций обратных задач динамики в мобильных комплексах экологического мониторинга для стабилизации движения при возникновении нештатных ситуаций

О. А. Машков, Ю. В. Мамчур, С. В. Жукаускас, С. А. Нігородова

В статье предложено применить концепцию обратных задач динамики для создания системы управления мобильного комплекса экологического мониторинга. Предложенный подход целесообразно использовать при решении задачи стабилизации движения в условиях нештатных ситуаций. Обосновано, что формирование системы управления на основе концепции обратной задачи динамики предполагает решение двух задач. Первая задача - это определение управляющей силы для объекта управления. Вторая - это определение алгоритма управления силой. В статье предложено аналитическое выражение для вектора управляющей силы, которое учитывает свойства объекта управления, начальные условия, задание программной траектории движения. Предложена аналитическая оценка качества процесса управления при нештатных ситуациях с использованием алгоритма на основе решения обратных задач динамики. Предложено аналитическое выражение для времени переходного процесса в системе управления для двух случаев - как без внешних возмущений, так и при возбуждении системы управления. Даны практические рекомендации по построению системы мобильного экологического мониторинга.

**Ключевые слова:** обратная задача динамики, переходный процесс, программная траектория движения, система управления, время переходного процесса, качество управления.

#### Application of the concepts of inverse problems of dynamics in mobile complexes of environmental monitoring to stabilize the movement in case of emergency situations

O. Mashkov, Yu. Mamchur, S. Zhukauskas, S. Nigorodova

The article proposed to apply the concept of inverse problems of dynamics to create a control system for a mobile environmental monitoring system. The proposed approach is advisable to use when solving the problem of stabilizing the movement in emergency situations. It is substantiated that the formation of a control system based on the concept of the inverse problem of dynamics implies the solution of two problems. The first task is to determine the control force for the control object. The second is the definition of a power control algorithm. The article proposes an analytical expression for the control force vector, which takes into account the properties of the control object, initial conditions, the task of the programmed motion path. An analytical assessment of the quality of the control process in emergency situations using an algorithm based on solving inverse problems of dynamics is proposed. An analytical expression is proposed for the transient time in the control system for two cases, both without external disturbances and when the control system is excited. Practical recommendations on the construction of a mobile environmental monitoring system are given.

**Keywords:** inverse dynamics problem, transient process, programmed motion trajectory, control system, transient time, control quality.

О. В. Панова<sup>1</sup>, О. М. Тихенко<sup>2</sup>, К. Д. Ніколаєв<sup>2</sup>, О. В. Ходаковський<sup>3</sup>, О. Ю. Сапельнікова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>3</sup> Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Захисні властивості сплавів у різних частотних діапазонах екрануючих матеріалів мають складний характер. Предмет дослідження даної роботи – визначення амплітудно-частотних залежностей коефіцієнта екранування електромагнітних полів сучасними металевими сплавами. Досліджено: традиційні матеріали; електротехнічні сталі різного класу та алюмінієвого сплаву, які мають різну ширину захисного екрану; металовмісні шнури різного (двошарового та тришарового) сплетіння. Досліджено залежності захисних екранувальних властивостей магнітного поля за рахунок відбиття для електротехнічної сталі класу 121 та сплаву з дюралюмінію та електротехнічної сталі. Мета роботи – визначення коефіцієнтів екранування у низькочастотній та середньо-частотній областях електромагнітного спектра на основі вимірювання коефіцієнтів екранування найбільш поширених металевих захисних матеріалів та надати обґрунтовані рекомендації щодо їх найбільш ефективного використання у робітничих умовах для захисту від електромагнітних полів та випромінювань працюючих та сумісності електричного та електронного технічного обладнання. Розроблено амплітудно-частотні залежності коефіцієнта екранування електромагнітних полів сучасними стандартними металевими сплавами для захисту людей і для забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного технологічного обладнання. Запропоновано захисні заходи захисту від впливу від електромагнітних полів та випромінювань, що засновані на принципах розумної достатності, з урахуванням мінімальних витрат. Доведено експериментально та економічно обґрунтовано, що найбільш ефективним засобом захисту від електромагнітної безпеки на підприємствах в умовах складної дії різноманітних електромагнітних полів, є електротехнічні сталі. В результаті отриманих співвідношень захисних властивостей (за рахунок електромагнітної енергії та відбиття електромагнітних хвиль) раціоналізовано захисні модифікаційні конструкції з мінімальним коефіцієнтом відбиття електромагнітних хвиль у небажаному напрямку в різному частотному діапазоні. Такі висновки надали змогу запропонувати методологію розрахунку щодо необхідної оптимальної товщини захисного магнітного екрана найбільш сприятливої ефективності у даних умовах. Це дозволяє мінімізувати обсяг довідникових та експериментальних даних та одночасно визначити товщину екрана необхідної ефективності, а також зменшує загальну вартість захисної конструкції.

**Ключові слова:** електромагнітні поля; випромінювання; екранування; електромагнітна сумісність; технічні засоби.

### Вступ

У сучасних умовах складних амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів, притаманних виробничим умовам найбільша увага приділяється розробленню композитних електромагнітних екранів. Але, у багатьох випадках, особливо за наявності відносно вузької частотної смуги електромагнітного поля, достатньо ефективними можуть бути традиційні металеві захисні конструкції. У першу чергу це стосується енергетичної галузі, де превалюють електричні та магнітні поля наднизької частоти, а також виробничих умов з незмінною у часі електромагнітною обстановкою.

Такі захисні екрани мають низку переваг – виготовляються з матеріалів широкої номенклатури, що виробляється металургійною галуззю, до того ж відносно дешеві.

Але недоліком сплавів чорних та кольорових металів є складність залежностей коефіцієнтів екранування від частоти та амплітуди поля, яке потребує екранування.

Такі залежності не монотонні, тобто потребують дослідження саме ці параметри, що надає змогу обґрунтувати найбільш сучасні рекомендації ефективного застосування металевих електромагнітних екранів.

Дослідження, виконані у попередні роки здійснювалися здебільшого з використанням несертифікованого лабораторного обладнання, або стандартних вимірювачів електричного та магнітного поля промислової частоти з максимальними похибками вимірювань до 3 дБ.

На теперішній час це не прийнятне, наприклад через те, що загальноєвропейські стандарти з електромагнітної сумісності, які набули чинності в Україні методом підтвердження, дуже жорсткі.

Тому, необхідно мати надійні й максимально точні дані щодо коефіцієнтів екранування найбільш поширених металевих екрануючих матеріалів з урахуванням специфіки реальних виробничих умов. Це дасть змогу надання рекомендацій щодо їх ефективності у залежності від амплітудних та частотних характеристик екранованого поля й електрофізичних характеристик екрануючих матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Чинні санітарні норми електромагнітної безпеки [1] рекомендують у якості електромагнітних екранів використання міді й алюмінію та їх сплавів, електротехнічних сталей та їх пермалоїв. Не дивлячись на це, у довідковій літературі практично відсутні дані щодо їх захисних властивостей.

Здебільшого показано, що коефіцієнти екранування мають тенденцію до підвищення зі збільшен-

ням частоти екранованого поля. Частина досліджень розрахункового характеру оперує абстрактним провідним матеріалом з фіксованими електрофізичними властивостями [2–4].

Такі роботи сприяють обиранню потрібного класу захисних сплавів, але не надають конкретних рекомендацій щодо їх застосування у реальних виробничих умовах різного призначення.

У роботі [5] надано результати досліджень залежностей коефіцієнтів екранування деяких сталей від амплітудних та частотних характеристик магнітного поля, зокрема показано, що у багатьох випадках ці залежності немонотонні. Але дослідження виконані з використанням отриманого обладнання [6], яке заздалегідь має великі похибки вимірювань, про що свідчить калібровочний графік.

Виконано ряд досліджень та розрахунків, щодо захисних властивостей матеріалів відносно нового класу – аморфних металевих сплавів. Так, у роботі [7] наведено результати вимірювань коефіцієнтів екранування магнітом'якого аморфного сплаву на основі кобальту (до 70 %). Дослідження виконані з використанням осцилографу та індукційного датчика без осердя. Це обумовлює низькі рівні сигналів та великі приладні похибки.

Останнім часом аморфні сплави набули поширення для виготовлення радіотехнічних комплектуючих через їх високі магнітні проникності (до 800000) та стабільність магнітних властивостей. Щодо їх використання як екрануючих матеріалів, то дані дуже суперечливі.

Виробники аморфних сплавів (ГАММЕТ, МАРІК, ММР50) не надають їх хімічного складу, але представлені коефіцієнти екранування дуже різняться як за значеннями, так і за амплітудно-частотними залежностями.

Враховуючи високу міцність, малу товщину та великі магнітні проникності доцільно дослідити параметри аморфних сплавів, які виробляються в Україні (висококобальтові) та порівняти їх з властивостями традиційних магнітом'яких матеріалів (пермалоїв) з близькими магнітними властивостями.

Але усі ці матеріали досить дорогі у виробництві і доцільні до застосування в умовах, коли інші серійні матеріали недостатньо ефективні.

Наведене обумовлює необхідність проведення комплексних досліджень захисних властивостей усіх поширених класів металевих матеріалів з уточненням амплітудно-частотних залежностей коефіцієнтів екранування.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – на основі вимірювання коефіцієнтів екранування найбільш поширених металевих захисних матеріалів надати обґрунтовані рекомендації щодо їх найбільш ефективного використання у реальних виробничих умовах різного призначення.

### Виклад основного матеріалу

Для визначення коефіцієнтів екранування у низькочастотній та середньо-частотній областях електромагнітного спектра використовувався повірений аналізатор електромагнітного спектра SPECTRA

NNF 5035. Максимальна основна похибка вимірювань перевищувала 1 % (згідно паспортних даних).

Враховуючи, що максимальна частота для цього приладу складає 2 МГц, для вимірювань коефіцієнтів екранування електромагнітного поля вищих частот використовувався калібрований вимірювач напруженості електричного та магнітного поля ПЗ-31.

Максимальна основна похибка вимірювань не перевищувала 3 %. У областях низьких частот електромагнітний екран був геометрично замкнений. Для дуже високих і вищих частот екран був плоский, вміщений у отвір суцільного металевого листа, що виключало проникнення поля поза екраном.

Кольорові метали не знайшли широкого використання у якості екрануючих матеріалів. Тільки мідна фольга використовується для захисту окремих електронних блоків для захисту від зовнішніх впливів, тобто забезпечення електромагнітної сумісності.

Найбільш поширеними є захисні конструкції з алюмінієвих сплавів, які використовуються як декоративні покриття [7]. Вони виготовляються зі сплавів Al, Cu, Mg (дуралюміні).

Було проведено дослідження впливу таких покриттів на електромагнітну обстановку у середині будівель. Так, у діапазоні частот 30 МГц–3 ГГц, коефіцієнти екранування алюмінієвого сплаву, нанесеного на бетонну стіну складала 20-24. Для суцільної будівлі з цього сплаву (ангару) цей показник складав 38-40.

Враховуючи малу товщину металевого листа (0,8 мм), можна зробити висновок, що значна частина захисту припадає на відбиття електромагнітних хвиль, що потребує уточнення.

Особливо це стосується електромагнітних полів низьких частот.

У загальному випадку дослідження захисних властивостей матеріалів повинні складатися з визначення загального коефіцієнта екранування та імплантації в нього захисту за рахунок відбиття.

На рис.1 та 2 представлені результати залежності коефіцієнта екранування найбільш розповсюджених електротехнічних сталей від частот екранованого магнітного поля.

Як видно з отриманих даних, захисні властивості (характеристики матеріалу) сплавів суттєво відрізняються, що потребує з'ясування.

Відомо, що поглинальні властивості феромагнітних матеріалів залежать, в основному, від їх магнітних властивостей (втрати на гістерезис, вихрові струми).

Так, питомі втрати сталі марок 2011 на частоті 50 Гц за магнітної індукції, числове значення якої 1,0 Тл, складають 3,8 Вт/кг. Ці параметри для сталей марок 2211 та 2312 за магнітної індукції 1,4 Тл складають відповідно 2,6 Вт/кг та 1,75 Вт/кг.

Але виявляється, що у практичній роботі визначення показників питомих втрат матеріалів досить складне.

Тому, можливо керуватися питомими опорами сплавів, які легко визначити компенсаційним методом подвійного мосту.



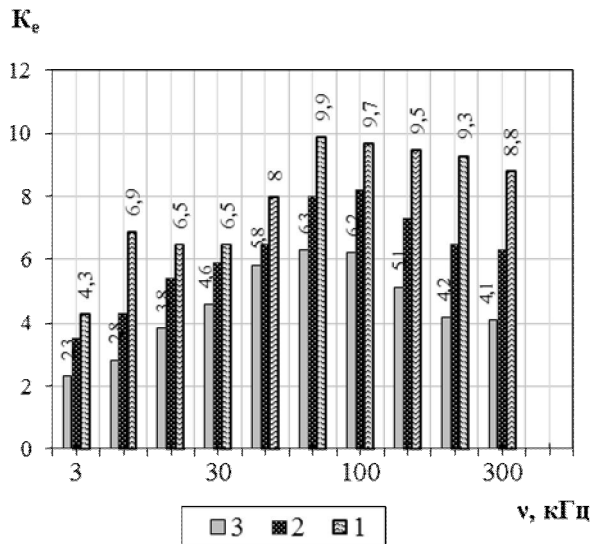


Рис. 1. Залежність екранувальних властивостей електротехнічних сталей (шириною 0,5 мм) від частоти магнітного поля, де 1; 2; 3 – сталі марок 2011, 2211, 2312 (відповідно)

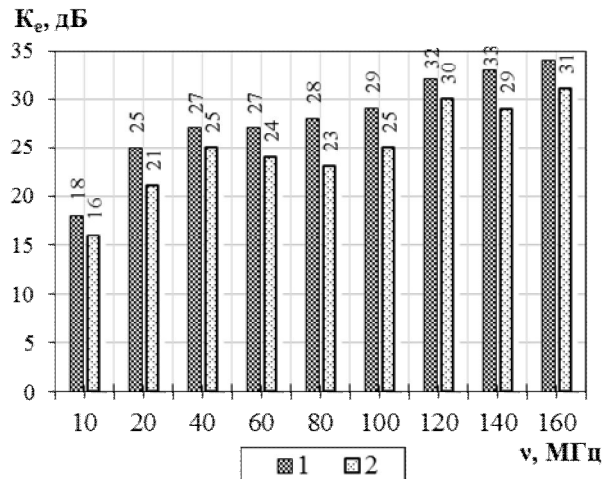


Рис. 2. Залежність екранувальних характеристик матеріалу з металовмісних шнурів від частоти екранованого поля, де 1 – тришарове ткане плетіння, 2 – двошарове ткане плетіння

Залежність коефіцієнтів екранування марок сталей від їх питомих опорів, показано на рис. 3.

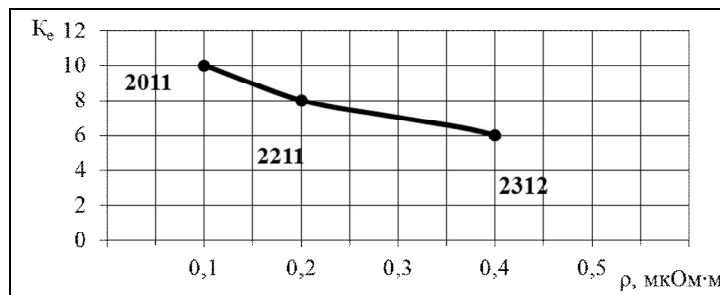


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів екранування електротехнічних сталей марок 2011, 2211, 2312 від їх питомих опорів на частоті 6 кГц

Отримані результати свідчать, що для цілей електромагнітного захисту найбільш доцільно використовувати електротехнічні сталі, найменш придатні для основного застосування (осердя та магнітопроводи).

Значна частина захисних властивостей сплавів у височастотній області припадає на відбиття електромагнітних хвиль. Це питання потребує додаткових досліджень та з'ясування причин його виникнення

Це пояснюють тим, що відбиття хвиль може відбуватися у небажаному напрямку.

Результати випробувань екранування магнітного поля за рахунок поглинання для електротехнічної сталі 121 класу та алюмінієвого сплаву показано на рис. 4 та 5. Дослідження проводились із зразками електротехнічної сталі та дуралюмінію різної товщини.

Криві на рис. 4 відповідають загальним функціям:

$$K_n = A \nu^n$$

де  $A$  - коефіцієнт пропорційності,  $\nu$  - частота поля).

Наведені дані доцільно використовувати для розроблення організаційно-технічних заходів з електромагнітної безпеки у конкретних виробничих

умовах, коли критичними є відбиття електромагнітних хвиль та необхідність одночасного забезпечення електромагнітної сумісності електричних та електронних технічних засобів [8].

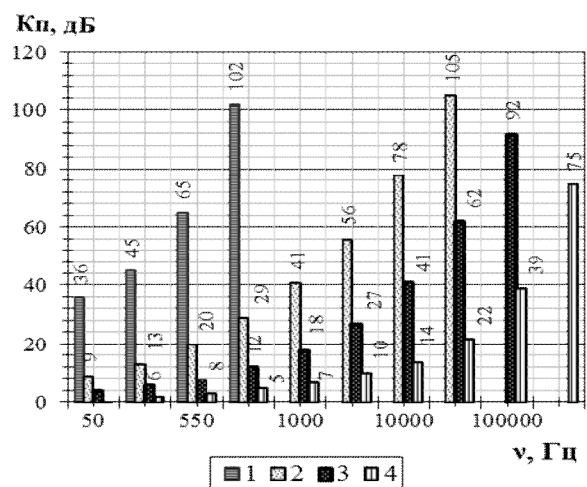


Рис. 4. Співвідношення екранування магнітного поля за рахунок поглинання для електротехнічної сталі класу 121 та алюмінієвого сплаву, де 1, 2 – сталь електротехнічна 3 мм та 0,5 мм (відповідно); 3, 4 – дуралюміній Д1 3 мм і 0,5 мм (відповідно)

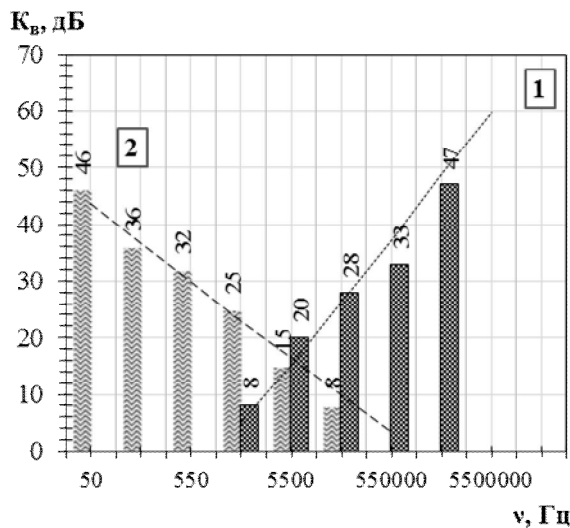


Рис. 5. Залежність екранувальних властивостей магнітного поля за рахунок відбиття для електротехнічної сталі класу 121 та алюмінієвого сплаву; де 1 – дуралюміній; 2 – електротехнічна сталь

Необхідно також враховувати, що екранування потребують поля поширеного частотного спектра, а довідкові дані щодо електромагнітних властивостей серійних матеріалів описуються для частот 50 Гц та 400 Гц у магнітних полях індукцією, числове значення яких складає 1,0–1,7 Тл, та напруженостями 0,4 А/м та 10 А/м (відповідно).

Зазвичай використовуються матеріали, зокрема електротехнічні сталі, з номенклатури, що виробляються промисловістю 0,15 – 5,0 мм.

Для захисту від магнітних полів малих напруженостей (до 10 А/м) товщина листа майже не критична. Для більших напруженостей ефективність екранування необхідно розраховувати.

Співвідношення, наведені у багатьох джерелах, наприклад [5, 8, 9] не завжди прийнятні через необхідність наявності експериментальних даних, щодо коефіцієнта відбиття, погонного ослаблення поля тощо. Для визначення необхідної товщини екрана доцільно спиратися на фундаментальні співвідношення:

$$H_1 = H_0 e^{-\alpha d},$$

де  $\alpha = \sqrt{rf\mu_a\delta}$ ,  $H_1$  – напруженості вихідних електричного і магнітного полів;  $d$  – товщина екрана;  $f$  – частота екранованого поля;  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність матеріалу;  $\delta$  – питома провідність матеріалу.

Питоми провідності сплавів або відомі, або визначаються як величини, зворотні питомим опорам.

Щодо  $\mu_a$ , та її значенням є ефективна магнітна проникність за конкретних параметрів екрана. Але у разі потреби ця величина може бути розрахована та екстрапольована з використанням професійного пакету COMSOL [9].

Для більшої корисності результатів у подальшому доцільно отримати експериментальні дані щодо ефективних магнітних проникностей найбільш поширених екрануючих матеріалів з наданням рекомендацій щодо їх максимальної ефективності для захисту працюючих на виробництвах для різного класу призначення.

## Висновки

1. Уточнені амплітудно-частотні залежності коефіцієнта екранування магнітних полів стандартними металевими сплавами дозволяють застосовувати їх як для захисту працюючих, так і для забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного технологічного обладнання.

2. Отримані експериментальні дані свідчать, що для цілей електромагнітної безпеки найефективнішими є електротехнічні сталі, найменш придатні для основного застосування.

Це дає змогу здійснювати захисні заходи на принципах розумної достатності з мінімальними витратами.

3. Отримані співвідношення захисних властивостей за рахунок поняття електромагнітної енергії та відбиття електромагнітних хвиль дозволить раціоналізувати захисні конструкції з мінімізацією відбиття електромагнітних хвиль у небажаному напрямку.

4. Надана методологія розрахунку необхідної товщини магнітного екрана дозволяє за мінімальних обсягів довідникових та експериментальних даних однозначно визначити товщину екрана необхідної ефективності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів: Д Сан Пін 3.3.6.096-2002. [Чинний від 2003-01-04]. К.: МОЗ України, 2003. 16 с. (Державні санітарні норми України).
2. Резинкина М. М., Гринченко В. С., Думанский Ю. Д., Медведев С. В. Экранирование магнитного поля промышленной частоты в рабочих зонах электростанций. *Гигиена населенных мест*. 2010. Вып. 55. С. 249–255.
3. Резинкина М. М. Использование численных расчётов для выбора средств экранирования от действия магнитных полей. *Журнал технической физики*. 2007. Т.77., № 11. С. 17–24.
4. Bhattacharjee S. Protective Measures to Minimize the Electromagnetic Radiation. *Electronic and Electric Engineering*. 2014. Vol. 4. P. 375–380.
5. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Державна установа «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». Київ, 2014. 151 с.
6. Пристрій контролю захисних властивостей електромагнітних екранів: пат. 58604 Україна: МПК G01L9/00; заяв. 15.03.2011; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.
7. 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.

8. Панова О.В. Загальні критерії застосування електромагнітних екранів для забезпечення електромагнітної безпеки та сумісності технічного обладнання. *Вісник Донецького гірничого інституту*. 2018. Вип. 2. URL: [https://jdmi.donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/02/Panova\\_JDMI\\_2\\_2018.pdf](https://jdmi.donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/02/Panova_JDMI_2_2018.pdf)
9. Glyva V. A., Podoltsev A. D., Bolibrukh B. V., Radionov A. V. A thin electromagnetics field of a composite structure made on the basis of a magnetic fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P. 14–18.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. А. Глива,  
 Національний авіаційний університет, Київ  
 Received (Надійшла) 28.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

### Исследование защитных свойств металлических электромагнитных экранов и определения условий их максимальной эффективности

Е. В. Панова, О. Н. Тихенко, О. В. Ходаковский, О. Ю. Сапельникова

Защитные свойства сплавов в различных частотных диапазонах экранирующих материалов имеют сложный характер. Предмет исследования данной работы - определение амплитудно-частотных зависимостей коэффициента экранирования электромагнитных полей современными металлическими сплавами. Исследованы традиционные материалы; электротехнические стали различного класса и алюминиевого сплава, которые имеют разную ширину защитного экрана; металлосодержащие шнуры различного (двухслойного и трехслойного) сплетения. Также исследованы зависимости защитных экранирующих свойств магнитного поля за счет отражения для электротехнической стали класса 121 и сплава из дюралюминия и электротехнической стали. Цель работы - определение коэффициентов экранирования в низкочастотной и среднечастотной областях электромагнитного спектра на основе измерения коэффициентов экранирования наиболее распространенных металлических защитных материалов; предоставить обоснованные рекомендации для их наиболее эффективного использования на производстве для защиты от электромагнитных полей и излучений работающих людей и совместимости электрического и электронного технического оборудования. Исследованы амплитудно-частотные зависимости коэффициента экранирования электромагнитных полей современными стандартными металлическими сплавами для защиты людей и для обеспечения электромагнитной совместимости электрического и электронного технологического оборудования. Предложено меры по защите от воздействия от электромагнитных полей и излучений, основанных на принципах разумной достаточности, с учетом минимальных затрат на производство таких мероприятий. Доказано экспериментально и экономически обосновано, что наиболее эффективным средством защиты от электромагнитной безопасности на предприятиях в условиях сложного действия различных электромагнитных полей, является электротехнические стали. В результате полученных соотношений защитных свойств (за счет электромагнитной энергии и отражения электромагнитных волн) рационализировано защитные модификационные конструкции с минимальным коэффициентом отражения электромагнитных волн в нежелательном направлении в разном частотном диапазоне. Такие выводы предоставили возможность предложить методологию расчета по определению интересующей оптимальной толщины защитного магнитного экрана наиболее благоприятной эффективности в данных условиях. Это позволяет минимизировать объем справочных и экспериментальных данных и однозначно определить толщину экрана необходимой эффективности, а также уменьшает общую стоимость защитной конструкции.

**Ключевые слова:** электромагнитные поля; излучения; экранирование, электромагнитная совместимость, технические средства.

### Researching the protective properties of metallic electromagnetic screens and determining their maximum efficiency conditions

E. Panova, O. Tykhenko, O. Khodakovsky, O. Sapelnikova

Protective properties of alloys used in shielding materials of various frequency range are complex. The subject of this study is to determine the amplitude-frequency dependences of modern metal alloy electromagnetic fields' screening coefficient. Researched: traditional materials; electrical steel of various classes and aluminum alloys, which have different widths of protective screen; metal-containing cords of various (two-layer and three-layer) plexus. The dependences of the protective shielding properties of the magnetic field due to reflection for Class 121 electrical steel and an alloy of duralumin and electrical steel have also been investigated. The purpose of this work is to determine screening coefficients in low-frequency and mid-frequency regions of electromagnetic spectrum based on measuring the screening coefficients of the most common metal protective materials; to provide reasonable recommendations for their most effective use in production for protecting the workers and electronic technical equipment against electromagnetic fields and radiation. Measures of protection against electromagnetic field and radiation exposure, based on the principles of reasonable sufficiency, taking into account the least possible spending on them are proposed. It has been proved experimentally and economically that the most effective means of protection against electromagnetic safety in enterprises under the complex effects of various electromagnetic fields is electrical steel. As a result of the obtained ratios of protective properties (due to electromagnetic energy and electromagnetic wave reflection), protective modification designs with a minimum coefficient of electromagnetic wave reflection in an unwanted direction in a different frequency range have been rationalized. Such conclusions provided an opportunity to propose a calculation method for determining the optimal thickness of the protective magnetic shield, for the most favorable efficiency in these conditions. This minimizes the amount of referencial and experimental data and also determines the thickness of the screen for the required efficiency, reducing the total cost of the protective structure.

**Keywords:** electromagnetic fields; radiation; shielding, international standards, electromagnetic compatibility, technical means.

М. В. Бахмат<sup>1</sup>, Ю. І. Бударецький<sup>1</sup>, Т. В. Лаврут<sup>1</sup>, В. В. Бондарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна

<sup>2</sup> Науково-дослідний центр ракетних військ і артилерії, Суми, Україна

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРУ ДОПЛЕРІВСЬКОГО СИГНАЛУ НА ВИХОДІ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОГО МОДУЛЮ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ РУХУ

**Мета статті** – аналітичне та експериментальне визначення спектру доплерівського сигналу на виході приймально-передавального модулю радіолокаційного вимірювача параметрів руху. **Результати дослідження.** В статті наведені структурні схеми радіолокаційного вимірювача параметрів руху, який призначений для використання в автономних підсистемах навігації та топогеодезичної прив'язки наземних рухомих об'єктів. Наведені експериментальні данні підтверджують основні положення аналітичних досліджень. Показано, що ширина спектру доплерівського сигналу однозначно визначається шириною діаграми спрямованості приймально-передавальних антен. **Висновок.** Наведені експериментальні данні підтверджують основні положення аналітичних досліджень. Результати, що отримані в процесі дослідження призначені для подальшої розробки на їх підставі близьких до оптимальних алгоритмів визначення параметрів руху наземних рухомих об'єктів.

**Ключові слова:** навігаційні системи, вимірювачі параметрів руху.

### Вступ

**Аналіз проблеми та наукових публікацій.** Сьогодні проблема оперативного отримання і використання даних щодо місця розташування здобула виключно актуальність. Так, за оцінками закордонних військових експертів 80% трудовитрат з організації управління процесами, що відбуваються, пов'язано з пошуком відповідей на питання: «Де знаходжусь?», «Куди рухатись?» [1].

Найбільш поширені засоби навігації та топогеодезичної прив'язки, що використовують данні супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) не завжди працездатні в критичних умовах. Тому для визначення місцеположення наземних рухомих об'єктів широко використовуються інерційні навігаційні системи (ІНС) і одометричні засоби навігації і топогеодезичної прив'язки, які доповнюють СРНС шляхом комплексування даних, що отримані за різними фізичними принципами, а в разі їх подавлення працюють в автономному режимі [2, 3]. **Метою даної статті** є аналітичне та експериментальне визначення спектру доплерівського сигналу на виході приймально-передавального модулю радіолокаційного вимірювача параметрів руху (РВПР).

### Результати досліджень

Серед одометричних засобів навігації розрізняють контактні (механічні) і безконтактні (радіолокаційні, лазерні і оптичні) вимірювачі. Традиційні методи визначення параметрів руху наземних рухомих об'єктів (НРО), що використовуються в сучасних спідометрах і одометрах та засновані на контактних методах вимірювання за допомогою підрахунку числа обертів колеса або трансмісії мають значну похибку за рахунок зміни діаметру колеса та його

проковзування при русі дорогами з різним покриттям, особливо по бездоріжжю та пересіченій місцевості. Практика показує, що кардинальним рішенням для визначення параметрів руху НРО, в тому числі і на бездоріжжі, є використання безконтактного вимірювання фактичної швидкості, прискорення руху і пройденого шляху за допомогою радіолокаційного вимірювача параметрів руху (РВПР) з двома приймально – передавальними антенами, діаграми спрямованості яких розташовані під кутом 90° і направлені вперед-назад під кутом 45° відносно полотна дороги [4].

Функціонально РВПР складається з чотирьох основних складових частин: приймально-передавального модуля (ППМ), блоку цифрових вимірювань (БВ) з двонаправленим інтерфейсом RS-232, портативного комп'ютера (ПК) і блоку джерел вторинного електроживлення (БЖ). Залежно від типу випробувань до БВ можуть підключатись додаткові датчики [6].

Структурна схема основного складу РВПР наведена на рис. 1.

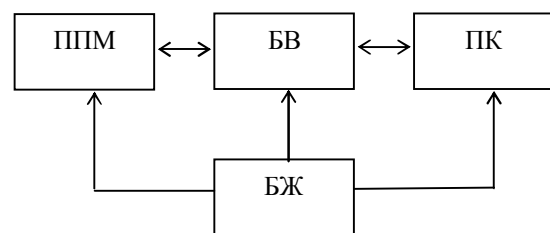


Рис. 1. Структурна схема РВПР

РВПР призначений для роботи в умовах ударних навантажень, вібрацій і широкого діапазону температур та може бути використаний для проведення шляхових випробувань, колісних і гусеничних

транспортних засобів, а також для вирішення інших прикладних задач, що вимагають високоточного вимірювання параметрів руху в умовах руху як залізницею та автодорожніми шляхами з твердим покриттям, так і бездоріжжям. Для забезпечення роботи комплексу за призначенням його основні складові частини виконують наступні функції.

ППМ здійснює формування та випромінювання зондуючого сигналу, прийом відбитого від полотна дороги сигналу з доплерівським зміщенням частоти, виділення і підсилення сигналу доплерівської частоти.

Блок вимірювань здійснює попередню обробку доплерівських сигналів, що надходять з ППМ і їх фільтрацію. Особливістю його побудови є використання цифрових методів обробки та фільтрації імпульсних сигналів, що дозволяє уніфікувати обробку сигналів, які надходять від різнотипних датчиків.

БЖ забезпечує формування всіх необхідних напруг живлення ППМ, БВ і ПК від бортової мережі об'єкту встановлення з напругою як 12, так і 24 В.

Програмне забезпечення ПК здійснює початкову установку та функціональний контроль АКБК, керує режимами його роботи, забезпечує накопичення та обробку даних, відображення вихідної інформації як в табличному, так і в графічному вигляді [4].

Розглянемо особливості побудови найбільш оригінальної частини РВПР – ППМ, оптимізація побудови якого значно впливає як на економічні, так і на експлуатаційні характеристики комплексу.

ППМ являє собою автодинний прийомопередавач 5-ти міліметрового діапазону хвиль.

Структурна схема ППМ наведена на рис. 2, згідно якої блок складається з передавального, приймального та антенного трактів.

До складу передавального тракту входять: стабілізатор струму А1, ЛПД-генератор G1, вентиль W1.

До складу приймального тракту входять: змішувальна камера W2, підсилювач доплерівської частоти А2, формувач імпульсів А3.

До складу антенного тракту входять: щілинний міст W3, рупорні антени W4, W5.

Для забезпечення функціонального контролю в ППМ передбачена можливість подачі сигналу "Контроль". Меандровий сигнал "Контроль" надходить з БВ і має частоту, яка знаходиться в діапазоні доплерівських частот. В ППМ цей сигнал надходить на стабілізатор струму і за рахунок 100% амплітудної модуляції зондуючого та гетеродинного сигналів формує на виході приймального тракту сигнал биття тої самої частоти. Конструктивно ППМ змонтований в оригінальному литому корпусі з габаритами 187x164x70 мм. Маса блоку не перевищує 2,5 кг. Основною конструктивною особливістю корпусу є те, що він забезпечує розташування осей діаграм спрямованості антен (ДСА) W4, W5 під кутом 45° до полотна дороги вперед-назад відносно напрямку руху. Другою конструктивною особливістю побудови ППМ є те, що вузли надвисокої частоти (НВЧ) передавального тракту G1, W1, приймального трак-

ту W2, та антенного тракту W3, W4, W5 жорстко з'єднані між собою без перехідних хвильоводів, що дозволяє оптимально мінімізувати габарити блоку в цілому і забезпечити його роботу в умовах вібрацій та ударних навантажень.

За функціональним призначенням робота блоку відбувається наступним чином.

Генератор G1 видає НВЧ сигнал

$$u_n(t) = A_n \cos \omega_0 t,$$

який через невзаємний пристрій (вентиль) W1, що служить для розв'язки та погодження генератора з антенним трактом, надходять на одне з плечей щілинного мосту W3. Тут відбувається розділення потужності між антенами W4, W5 на дві рівні частини, причому невелика частина потужності з рівнем (-15...-20) дБ надходить на змішувальну камеру W2.

Сигнал, що відбивається від полотна дороги, приймається антенами W4, W5 і має доплерівське зміщення частоти, яке в першому наближенні (без урахування кінцевої ширини ДСА), описується виразами:

$$\begin{aligned} u_{w4}(t) &= A_4 \times \cos(\omega_0 + \Omega_d)t, \\ u_{w5}(t) &= A_4 \times \cos(\omega_0 - \Omega_d)t, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\Omega_d = 2\pi F_d$ ,  $F_d$  – доплерівське зміщення частоти зондуючого сигналу.

В подальшому ці сигнали додаються в плечі щілинного мосту, якій навантажений на змішувальну камеру. Тут відбувається перемноження відбитих сигналів  $u_{w4}(t)$ ,  $u_{w5}(t)$  з сигналом  $u_n(t)$ , що відгалужується з виходу передавача:

$$\begin{aligned} u_d(t) &= u_{w4}(t) \times u_n(t) + u_{w5}(t) \times u_n(t) = \\ &= A_4 \cos(\omega_0 + \Omega_d)t \times A_n \cos \omega_0 t + \\ &+ A_5 \cos(\omega_0 - \Omega_d)t \times A_n \cos \omega_0 t. \end{aligned} \quad (2)$$

Після фільтрації гармонік з частотою  $2\omega_0$  виділяється сигнал різницевої частоти Доплера, який надходить в підсилювач доплерівської частоти (ПДЧ) А2:

$$u_d(t) = A_d (\cos \Omega_d t + \cos (-\Omega_d t)) = 2A_d \cos \Omega_d t. \quad (3)$$

Як відмічалось, основною особливістю побудови ППМ є те, що діаграми спрямованості антен W4, W5 розташовані під кутом 90° і спрямовані під кутом 45° до полотна дороги вперед-назад відносно напрямку руху.

Таке розташування антен і наведена схема селекції доплерівських сигналів значно зменшують похибки вимірювань, які виникають за рахунок подовжніх коливань корпусу об'єкту встановлення РВПР відносно його центру мас.

Суть особливості пояснюється рис. 2 і полягає в наступному.

Під час руху об'єкта, на якому встановлено РВПР, відносно поверхні, що опромінюється його ППМ, значення доплерівської частоти  $F_d$  і радіальної швидкості  $V_r$  пов'язані між собою відомим виразом:

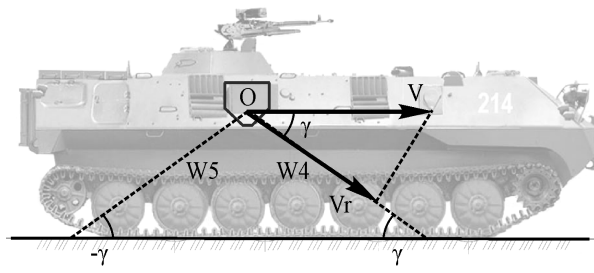


Рис. 2. Розташування антен РВПР на НРО

$$F_{\partial} = 2V_r \frac{f_0}{C}, \quad (4)$$

де  $F_{\partial}$  [Гц] доплерівське зміщення частоти;  $V_r$  [м/с] - радіальна складова швидкості взаємного переміщення об'єктів;  $f_0$  [Гц] - несуча частота зондуючого сигналу;  $C=3 \times 10^8$  [м/с] - швидкість розповсюдження радіохвиль.

Величина  $V_r$  пов'язана зі швидкістю переміщення об'єкту встановлення відносно поверхні, що опромінюється  $V$ , як

$$V_r = V \cdot \cos \gamma, \quad (5)$$

де  $\gamma$  - кут між вектором швидкості об'єкта, на якому встановлено РВПР, і напрямом на поверхню, що опромінюється.

При русі по пересіченій місцевості кут  $\gamma$  буде постійно змінюватись за рахунок коливань ППМ відносно точки О. З рис. 3 і виразів (1)...(5) видно, що за наявності в складі ППМ тільки однієї антени W4 виникатиме відповідна зміна доплерівської частоти, що веде до похибок оцінки швидкості руху, а за наявності двох антен W4 і W5 ці похибки компенсуються в наведеній схемі побудови ППМ.

Важливою особливістю побудови ППМ є те, що кожна антена опромінює полотно дороги з шириною ДСА  $\theta=10^\circ$ . Така ширина ДСА вибрана на основі експериментальних досліджень і, з одного боку, дозволяє підвищити точність вимірювань за рахунок усереднення амплітудних флуктуацій сигналу, що відбивається від полотна дороги в межах ширини променя, а з іншого - веде до складнощів вимірювання, які пов'язані з вторинним ефектом Доплера. Причина складнощів полягає в наступному.

В зв'язку з тим, що ДСА має кінцеву ширину, відбитий сигнал на вході приймача не являє собою монохроматичні коливання надвисокої частоти як це описують вирази 1-3, а займає деяку смугу частот  $\Delta F_{\text{доп}}$  (рис. 3).

Причина цього явища полягає в тому, що зондуючий сигнал відбивається не однією точкою земної поверхні, а множиною точок, які знаходяться в межах площини, що освітлюється променем антени. Оскільки напрями на ці точки з місця розташування антен різні, різними виявляються проекції шляхової швидкості на напрями, з яких ведеться прийом відбитих сигналів, і доплерівські зсуви частоти сигналів, що приймаються. При цьому інтенсивність різних складових спектру неоднакова.

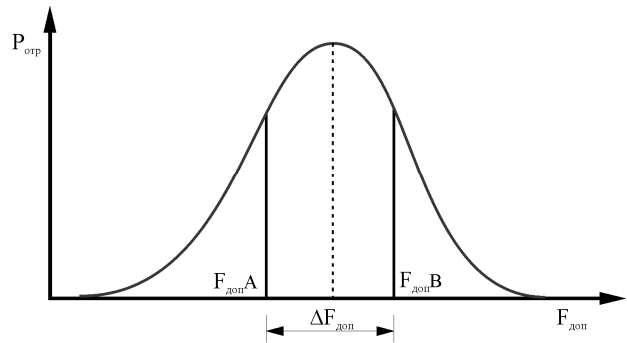


Рис. 3. Смуга частот  $\Delta F_{\text{доп}}$

Найбільшу інтенсивність мають складові спектру відбитого сигналу, що формуються в напрямку максимуму ДСА. Потужність спектральних складових, що формуються в напрямках, які не співпадають з напрямом максимуму, тим менша чим менше значення відповідних ним ординат ДСА, і змінюється пропорційно квадрату ДСА за потужністю. Таким чином, огинаюча спектру сигналів, що приймаються, визначається квадратом ДСА за потужністю, а результуючий сигнал на вході приймача являє собою сукупність коливань биття близьких між собою частот. Тому огинаюча результуючого коливання змінюється в часі.

Досвід шляхових випробувань і лабораторні дослідження свідчать, що огинаюча результуючого коливання являє собою досить складне коливання, і це коливання має вигляд випадкових змін напруги, яке за своїм характером нагадує випадковий процес. Для його опису в другому наближенні коливання на вході приймача можна представити в вигляді двох еквівалентних дискретних частот  $F_{\text{допА}}$  і  $F_{\text{допВ}}$ , які характеризують ширину ДСА на рівні 0,5.

Різниця між цими частотами складає  $\Delta F$ . Можна показати, що в спектрі відбитого коливання переважають частоти, які знаходяться в межах ширини спектру доплерівських частот  $\Delta F$ .

Механізм їх формування показано на рис. 4, на якому наведена схема опромінення полотна дороги.

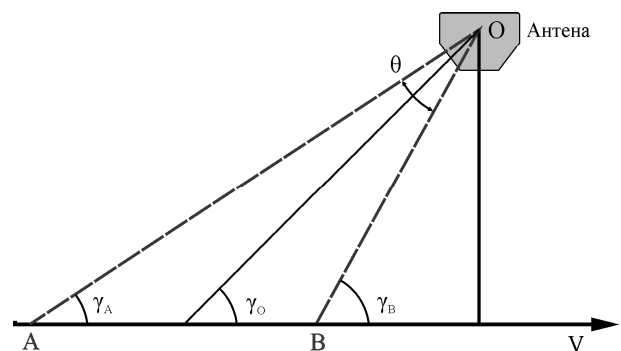


Рис. 4. Механізм формування доплерівських частот

При опромінюванні полотна дороги антеною з діаграмою спрямованості кінцевої ширини  $\theta$  внаслідок складання сигналів, що відбиваються від різних точок поверхні, яка опромінюється, виникають биття, які називають вторинним ефектом Доплера.

Для запису форми сигналу, що відбивається, відокремимо дві крайні точки плями А і В, при цьому будемо рахувати, що вектор швидкості  $V$  співпадає з відрізком АВ. Частоти коливань, що відбиваються від крапкових цілей А і В при розміщенні антени давача в точці О, визначаються як:

$$f_{ДА} = f_0 + \frac{2V \cos \gamma_A}{\lambda}, \quad (6)$$

$$f_{ДВ} = f_0 + \frac{2V \cos \gamma_B}{\lambda},$$

де  $f_0$  і  $\lambda$  несуча частота та довжина хвилі РЛС відповідно.

При цьому частота биття результуючих коливань від крапкових цілей буде:

$$\Delta f_{Д} = f_{ДА} - f_{ДВ} = \frac{2V(\cos \gamma_A - \cos \gamma_B)}{\lambda} = \frac{2V}{\lambda} 2 \sin \frac{\gamma_A + \gamma_B}{2} \sin \frac{\gamma_A - \gamma_B}{2}.$$

З урахуванням того, що:

$$\gamma_A = \gamma_0 - \frac{\theta}{2}, \gamma_B = \gamma_0 + \frac{\theta}{2}, \quad (8)$$

$$\sin \frac{\gamma_B + \gamma_A}{2} = \sin \gamma_0, \sin \frac{\gamma_B - \gamma_A}{2} = \sin \frac{\theta}{2}, \quad (9)$$

максимальне значення вторинної частоти Доплера дорівнює:

$$F_{Д} = \frac{2V}{\lambda} \sin \gamma_0 \sin \frac{\theta}{2}. \quad (10)$$

Значення доплерівського зміщення частоти сигналу, що відбивається від полотна дороги з урахуванням виразів (2, 3) можна записати

$$f_{Д} = \frac{2V}{\lambda} \cos \gamma_0. \quad (11)$$

Формули (10), (11) дозволяють встановити коефіцієнт зв'язку між частотами первинного  $f_0$  і вторинного  $F_{Д}$  ефекту Доплера, який дорівнює:

$$K = \frac{f_{Д}}{F_{Д}} = \frac{ctg \gamma_0}{2 \sin \frac{\theta}{2}}. \quad (12)$$

З (12) видно, що частоти  $f_0$  і  $F_{Д}$  пов'язані між собою, при чому коефіцієнт зв'язку не залежить від швидкості руху.

Наприклад, для прийнятих в системі значень параметрів:  $\gamma_0=45^\circ$ ,  $\theta=10^\circ$  коефіцієнт зв'язку дорівнює

$$K = \frac{f_{Д}}{F_{Д}} \approx 5,7.$$

Наведені аналітичні вирази, що пояснюють формування спектру доплерівського сигналу, підтверджені результатами експериментальних досліджень (рис. 5).

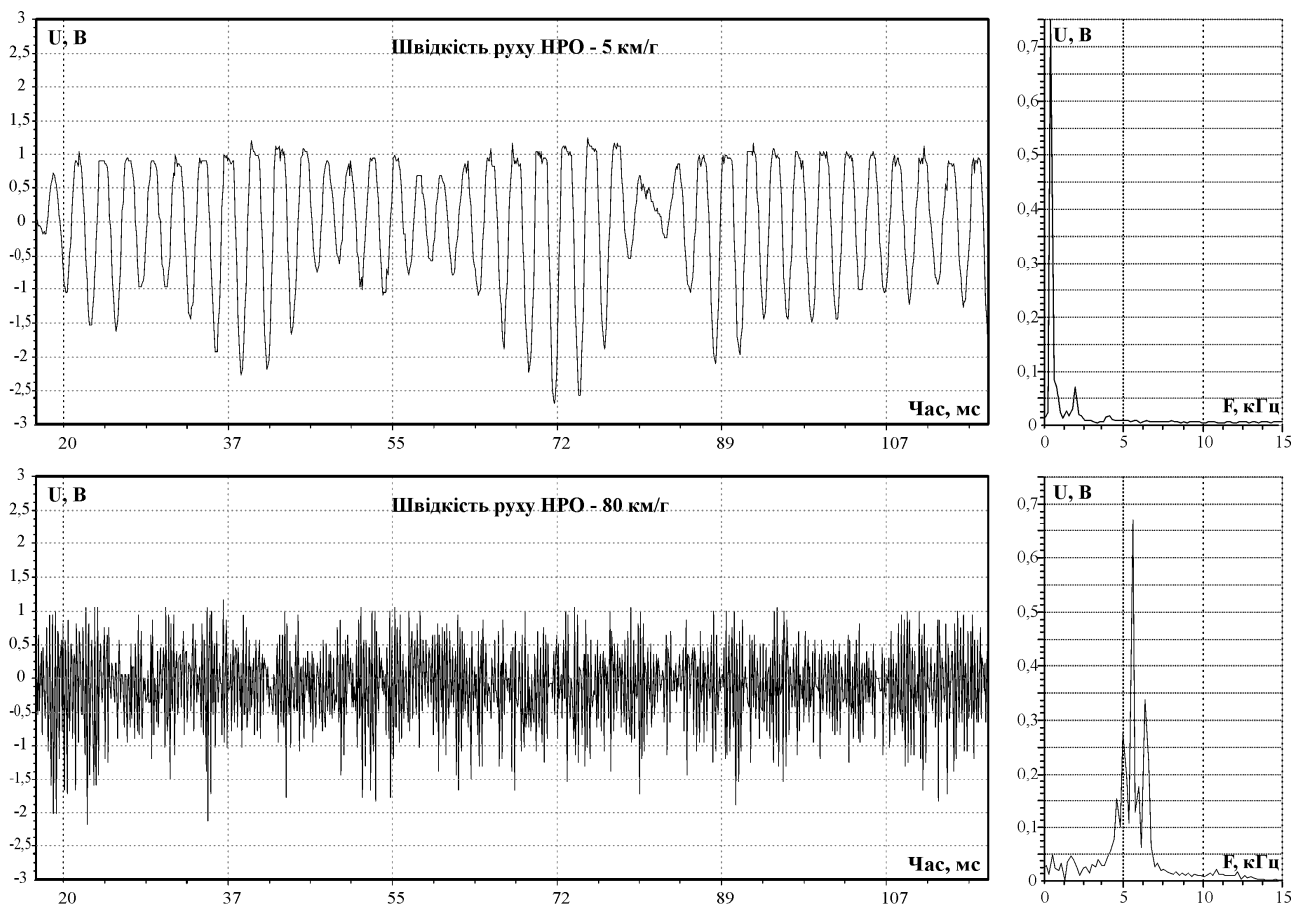


Рис. 5. Експериментальні осцилограми форми та спектру сигналів на виході ПІМ РВПР

Ці результати надають підставу для розробки алгоритмів його обробки і на її основі визначення параметрів руху НРО.

### Висновки

Визначені аналітичні залежності для частот первинного і вторинного ефекту Доплера сигналів, що формуються на виході ППМ РВПР. Знайдені співвідношення між цими частотами для конкретної реалізації ППМ. Результати експерименту підтвердили теоретичні висновки, а також засвідчили наявність вторинного ефекту Доплера за рахунок

кінцевої ширини діаграми спрямованості приймально-передавальних антен РВПР.

**Напрямок подальших досліджень** – підвищення точності і завадозахищеності автономних систем навігації та топогеодезичної прив'язки шляхом структурно-алгоритмічної оптимізації радіолокаційного вимірювача параметрів руху наземних рухомих об'єктів, а саме: зменшення впливу фазових флуктуацій сигналів, що відбиваються від земної поверхні, на точність вимірювання; розробка алгоритмів обробки сигналів РВПР і на її підставі визначення параметрів руху НРО.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Требования к подсистемам топогеодезического и навигационно-временного обеспечения автоматизированных систем управления военного назначения. Наука и военная безопасность. – № 2/2007. – С. 43–48.
2. Льяшов О.А. Тенденції розвитку збройної боротьби у війнах четвертого-шостого поколінь / О.А. Льяшов // Наука і оборона, 2009. – № 3. – С. 43–49.
3. Корольов В.М. Аналіз світових тенденцій розвитку систем навігації для сухопутних військ / В.М. Корольов та ін. // Військово-технічний збірник. – Львів: НАСВ, 2011. – № 2 (5). – С. 19–29.
4. Сопільник Л.І. Методи підвищення точності оцінки місцеположення наземних рухомих об'єктів. /Л. Сопільник, Р. Заяць, Ю. Бударецький, Ю. Підвірний // Вимірювальна техніка та метрологія. – № 72. – 2011. – С. 137–141.
5. Бударецький Ю.І. Особливості побудови підсистеми визначення шляху та експериментальні дослідження її складових частин / Ю.І. Бударецький, М.Г. Грубель, М.І. Гладкий, С.М. Назаркевич // Розроблення та модернізація ОВТ. – 2009. – С. 31–35.
6. Кривов'яз А.Т. Методи побудови завадозахищених навігаційних систем для визначення місцеположення наземних рухомих об'єктів. / Кривов'яз А.Т., Бударецький Ю.І., Бахмат М.В. // Науковий вісник національного лісотехнічного університету України: Збірник науково-технічних праць. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2015. – Вип. 25.5. – С. 321–327.
7. Бударецький Ю.І. Економічна ефективність радіолокаційного вимірювача параметрів руху об'єктів РВіА та бронетехніки. / Ю.І. Бударецький, Л.І. Сопільник, С.Ю. Бударецький, М.В. Бахмат // Журнал “Наукові записки Львівського університету бізнесу та права.” – № 21/2019. – Львів: ЛУБП, 2019. – С. 21–28.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М. А. Павленко,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 16.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.10.2019

### Теоретические и экспериментальные исследования спектра доплеровского сигнала на выходе приёмно-передающего модуля радиолокационных измерителей параметров движения

М. В. Бахмат, Ю. І. Бударецький, Т. В. Лаврут, В. В. Бондарев

**Цель статьи** – аналитическое и экспериментальное определение спектра доплеровского сигнала на выходе приёмно-передающего модуля радиолокационного измерителя параметров движения. **Результаты исследования.** В статье приведены структурные схемы радиолокационного измерителя параметров движения, который предназначен для использования в автономных подсистемах навигации и топогеодезической привязки наземных подвижных объектов. Приведенные экспериментальные данные подтверждают основные положения аналитических исследований. Показано, что ширина спектра доплеровского сигнала однозначно определяется шириной диаграммы направленности приёмно-передающих антенн. **Вывод.** Приведенные результаты экспериментальных исследований подтверждают основные положения аналитических соотношений. Результаты, полученные в процессе исследования предназначены для дальнейшей разработки на их основании близких к оптимальным алгоритмов определения параметров движения наземных подвижных объектов.

**Ключевые слова:** навигационная система, измеритель параметров движения.

### Theoretical and experimental studies of the spectrum of the Doppler signal at the output transmit-receive module of radar measuring instruments of motion parameters

M. Bakhmat, Y. Budaretsky, T. Lavrut, V. Bondarev

The purpose of the article is the analytical and experimental determination of the Doppler signal at the output of the transmitter module of the radar meter of motion parameters. **Results of a research.** The article presents the structural diagrams of a radar meter of motion parameters, which is intended for use in autonomous navigation subsystems and topographic and geodetic reference of ground moving objects. The given experimental data confirm the main points of analytical studies. It is shown that the width of the spectrum of the Doppler signal is uniquely determined by the width of the radiation pattern of the transceiver antennas. **Conclusion.** The above experimental results confirm the main points of the analytical relationships. The results obtained during the study are intended for further development on their basis close to optimal algorithms for determining the motion parameters of ground moving objects.

**Keywords:** navigation system, radio locating instrument of movement measuring.



Є. Л. Казаков<sup>1</sup>, О. Є. Казаков<sup>2</sup>, В. М. Решетнік<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

<sup>2</sup> Харківська державна академія культури, Харків, Україна

<sup>3</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-РОЗСІЮЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЦІЛІ КОНІЧНОЇ ФОРМИ, ПОКРИТОЇ РАДІОПОГЛИНАЮЧИМ МАТЕРІАЛОМ

**Предметом** вивчення в статті є інформація про характеристики розсіювання РЛЦ при нанесенні на неї РПМ для вирішення прикладних завдань розпізнавання радіолокаційних цілей. **Метою** є отримання експериментальної оцінки поляризаційно-розсіюючих властивостей радіолокаційної цілі конічної форми на якій завдано поглинаючий матеріал магнітного типу. **Завдання:** зменшення помітності і збільшення помилок визначення координат РЛЦ при нанесенні на неї РПМ, оцінка відбивних характеристик (характеристик розсіювання) різних типів РПМ, отримання кількісних значень характеристик розсіювання цілей, покритих РПМ, для вузькосмугових сигналів. Використовуваними **методами** є: математичні моделі оптимізації, методи вирішення матричних задач. Отримані наступні **результати**. Використання РПМ призводить до істотного зниження ЕПР цілі в квазіоптичній області відображення радіохвиль при використанні вузькосмугового сигналу. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: При нанесенні на носову частину і на підставу мети конічної форми РПМ відбувається спотворення пелюсткової структури реалізації амплітуд відбитих від цих ділянок сигналів на основних і кросових поляризаціях при суміщеному прийомі, а також деяке зменшення значень амплітуд відбитих сигналів на основних поляризаціях квазіоптичній. Використання РПМ розглянутого типу також призводить до істотного зниження ЕПР цілі в області відображення радіохвиль при використанні вузькосмугового сигналу. Аналіз статистичних характеристик амплітуд відбитих від конуса сигналів (середнього значення і дисперсії), показав вплив розглянутого РПМ аналогічний впливу на реалізації даних амплітуд. Нанесення РПМ на окремі частини конуса також призводить до зменшення протяжності гістограм амплітуд відбитих сигналів на різних поляризаціях.

**Ключові слова:** радіолокаційна ціль, поляризаційна матриця розсіювання цілі, поглинаючий матеріал, вузькосмуговий сигнал.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В даний час для зменшення помітності і збільшення помилок визначення координат радіолокаційних цілей (РЛЦ) широке застосування знаходять радіопоглинаючі матеріали (РПМ). Однак, для їх успішного використання необхідно попередньо оцінити відбивні характеристики (характеристики розсіювання) різних типів цих матеріалів. Застосування в РЛС широкого діапазону частот на різних поляризаціях настійно вимагає отримання кількісних значень характеристик розсіювання цілей, покритих РПМ, для цих типів сигналів. Також в зв'язку з переходом при спостереженні за РЛЦ від однопозиційних РЛС до РЛС з рознесеним прийомом виникає необхідність отримання характеристик розсіювання РЛЦ з поглинаючими матеріалами в винесених на різні кути приймальних пунктах. Крім того доцільно провести аналіз отриманих характеристик розсіювання за одними і тими ж цілями стосовно різних використовуваних частот, поляризаціям і різних умов спостереження для одного і того ж вимірювального комплексу. Як досліджуваної мети буде використана модель конічної форми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Отримання інформації про характеристики розсіювання РПМ може бути здійснено двома шляхами: розрахунковим і на підставі експериментальних вимірювань. Перший шлях є досить складним і громіздким. Він вимагає знання величин діелектричної і

магнітної проникності РПМ і в ряді випадків не забезпечує досить високої точності визначення характеристик розсіювання цих матеріалів [1–3].

Другий шлях полягає в проведенні безпосередньо експериментальних вимірювань на полігонах з використанням спеціальних радіолокаційних установок або безлунних камер [4, 5]. У зв'язку з тим, що складні РЛЦ можуть бути утворені з сукупності об'єктів простої геометричної форми, доцільно отримати експериментальні дані по таких об'єктах з різними РПМ. Потім, використовуючи методи суперпозиції, отримувати значення характеристик розсіювання цілей для різних ракурсів спостереження. Однак, експериментальні дані, отримані в цих випадках, носять уривчастий характер для різних типів РПМ і в різних діапазонах довжин хвиль [4, 6]. Крім того, ці дані характеризують лише ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) кожного досліджуваного РПМ на одній основній поляризації.

**Метою статті** є експериментальне дослідження характеристик розсіювання об'єкта конічної форми з РПМ, що опромінюється сигналами на різних поляризаціях при суміщеному прийомі.

### Основний матеріал

В якості досліджуваної РЛЦ використовувалася модель конічної форми, зовнішній вигляд якої показаний на рис. 1. Дослідження проведені на експериментальному вимірювальному комплексі [7]. Як еталон використовувався куля діаметром 200 мм. РЛЦ і куля виконані з алюмінію. Вимірювання про-

водились на частоті  $f = 9160$  МГц. Коефіцієнт моделювання  $m = 3$ .

В експериментальних дослідженнях використовувався РПМ магнітного типу ВРП-3.

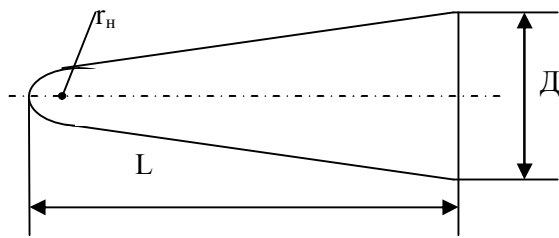


Рис. 1. Вид моделі цілі.  $L = 13000$  мм,  $D = 370$  мм,  $r_n = 46$  мм.

Радіотехнічні характеристики даного РПМ наведені в табл. 1, де  $\epsilon'$ ,  $\mu'$  дійсні частини діелектричної і магнітної проникності;  $\epsilon''$ ,  $\mu''$  - уявні частини;  $|R|$  - модуль коефіцієнта відбиття.

Таблиця 1 – Характеристики РПМ типу ВРП-3

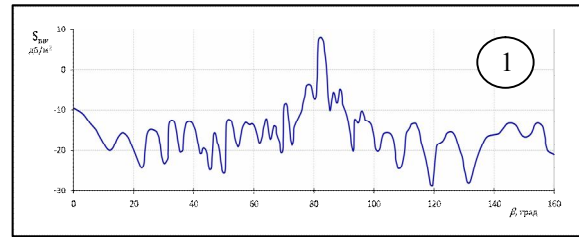
$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\mu'$	$\mu''$	$ R ^2$ , дБ
20	0	1,40	0,7	15

Товщина РПМ становила 1,3 мм. Для даної цілі використовувалося часткове покриття РПМ. Покриття наносилося на носову частину і на підставу цілі. Такі місця нанесення покриття обрані в зв'язку з тим, що розсіюючи властивості цілі в формі тіла обертання без зламів поверхні, характерні розміри якого перевищують довжину хвилі РЛС, визначаються внеском відображень від локальних ділянок розсіювання двох типів - еліптичного (носова частина) і кромочного типу. Ослаблення залишкового відображення, що виникає через різке відмінності імпедансу РПМ і металевої поверхні цілі на ділянці "кромка РПМ - конічна поверхня цілі", здійснюється шляхом вибору структури кромки РПМ. Для цього частину поверхні РПМ виконується у вигляді періодичної структури. Розміри закриваємих РПМ ділянок поверхні цілі більше або дорівнюють  $\lambda/2$ , а розміри періодичної структури складають  $\lambda$  експериментального комплексу.

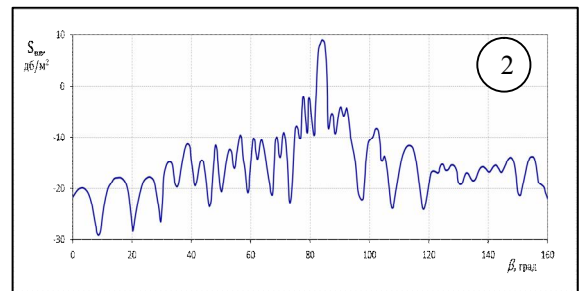
Для обраної моделі цілі досліджувалися наступні 4 варіанти часткового покриття, тут і надалі умовно позначені цифрами в дужках: 1 - без РПМ; 2 - з РПМ тільки на носовій частині; 3 - з РПМ тільки на кромці і підставі; 4 - з РПМ на носовій частині, кромці і підставі.

Результати вимірювань у вигляді діаграм зворотного вторинного відображення для амплітудних елементів ПМР в ракурсі кутів спостереження ( $0 \dots 180$ )<sup>0</sup> приведені на рис. 2 і 3. На рисунках по осі ординат відкладені значення ЕПР цілі в логарифмічному масштабі, розраховані за співвідношенням  $S$  (дБ/м<sup>2</sup>) =  $10 \log S$  (м<sup>2</sup>), а по осі абсцис - кут спостереження цілі в градусах (при  $\beta = 0$  носова частина цілі направлена в сторону експериментального комплексу). Перший індекс при  $S$  позначає поляризацію

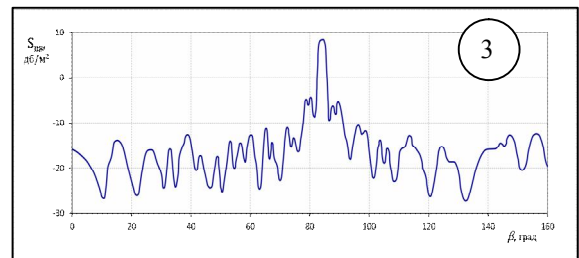
приймної антени, а другий - поляризацію передавальної антени.



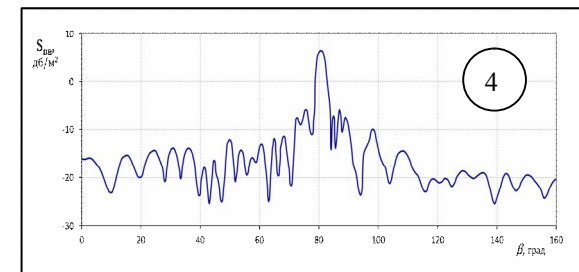
а



б



в



г

Рис. 2. Діаграми зворотного вторинного відображення для амплітудних елементів  $S_{BVP}$  ПМР в ракурсі кутів спостереження

На рис. 2 а, 3 а показані діаграми амплітудних елементів ПМР моделі цілі без покриття РПМ, а на рис. 2 б, в, г - для різних варіантів часткового покриття РПМ (варіанти покриття позначені цифрами в гуртках). Ефект зменшення ЕПР проявляється не у всьому діапазоні кутів спостереження і неоднаковий для всіх варіантів покриття. Найбільш істотне зниження середнього значення ЕПР проявляється для четвертого варіанту покриття в напрямках падіння хвилі, незначно відхиляється від осевого, і в області нормалі, проведеної до основи цілі. Зменшення середнього значення ЕПР в цих діапазонах кутів спостереження є наслідком закриття носової частини, кромки і підстави цілі РПМ, причому при падінні хвилі у напрямку нормалі до основи цілі ( $\beta = 180$ )<sup>0</sup>. Це зниження досягає  $\sim 12$  дБ.

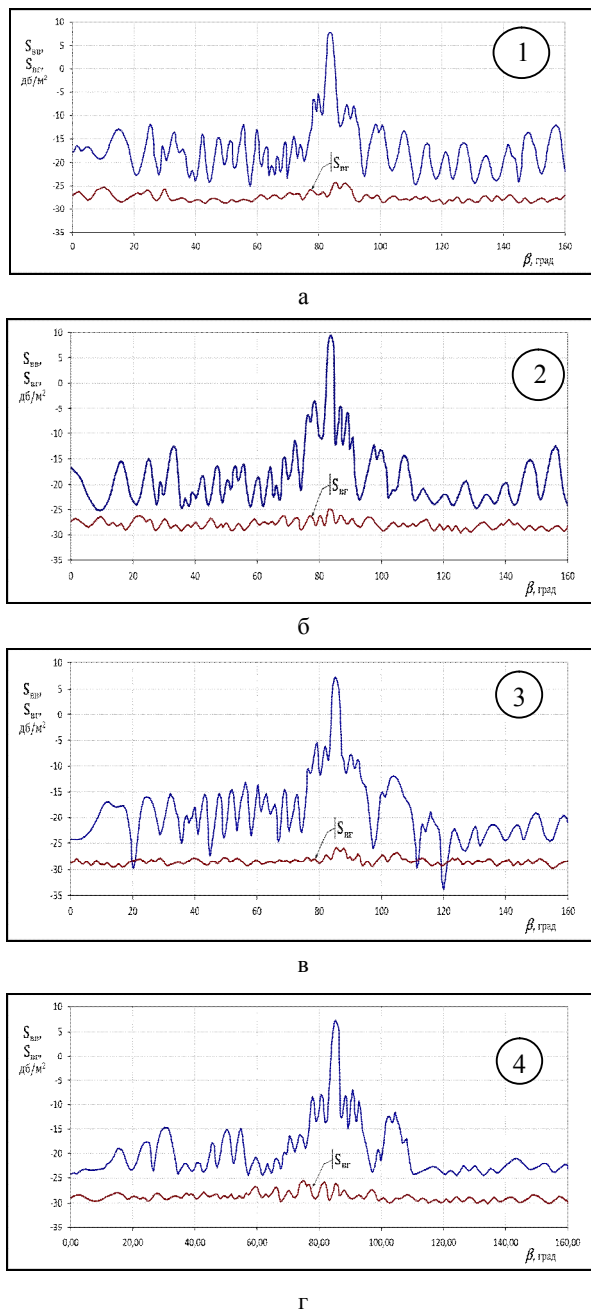


Рис. 3. Діаграми зворотного вторинного відображення для амплітудних елементів SGT і SBG ПМР в ракурсі кутів спостереження

За результатами експериментальних даних розраховані величини середніх значень і дисперсій флюктуацій амплітудних елементів ПМР моделі цілі при носових і бічних ракурсах спостереження і різних інтервалах усереднення  $\Delta\beta = (\pm 20^0; \pm 30^0; \pm 40^0; \pm 50^0; \pm 60^0)$ .

На рис. 4 а представлений характер зміни середнього значення ЕПР основних і кросового амплітудних елементів ПМР при носовому ракурсі спостереження моделі цілі, а на рис. 4 б - при бічному ракурсі спостереження. На цих рисунках по осі ординат відкладено середнє значення ЕПР, виражене в  $\text{м}^2$ , а по осі абсцис - інтервал усереднення  $\pm\Delta\beta$  в градусах, симетричний щодо ракурсу спостереження. Аналіз наведених на рис. 4 а, б графіків показує, що

найменше середнє значення ЕПР основних амплітудних елементів ПМР проявляється в напрямку зворотного відображення при носовому ракурсі спостереження ( $\beta = 0 \pm 20^0$ ) і варіанті покриття 4.

Існує відмінність в зниженні середнього значення ЕПР при вертикальній і горизонтальній поляризаціях зондуючого сигналу. Для бічного ракурсу спостереження найменше середнє значення ЕПР основних амплітудних елементів ПМР даної цілі проявляється в найбільшому з інтервалів усереднення ( $\beta = 90^0 \pm 60^0$ ), коли починає позначатися вплив ділянок закриття цілі четвертим варіантом покриття.

Вплив РПМ на зменшення середнього значення ЕПР "кросових" елементів ПМР моделі цілі не суттєво.

Дисперсія флюктуацій ЕПР елементів ПМР моделі цілі (рис. 4 в) з розширенням інтервалу усереднення для носового ракурсу спостереження зростає, а для бокового - зменшується (рис. 4 г).

Як приклад на рис. 5 і 6 представлені гістограми основного амплітудного елемента ПМР ( $S_{ГТ}$ ) при різних варіантах покриття конуса і різних ракурсах спостереження.

На рисунках по осі абсцис відкладені значення, виражені в метрах, а по осі ординат - кількість вимірювань, які потрапили в той чи інший інтервал спостереження значень  $F$ . Гістограми наведені для носового (рис. 5), і бічного (рис. 6) ракурсів спостереження і при інтервалі усереднення  $\Delta\beta = \pm 60^0$ . Варіанти покриття як і раніше позначені номерами 1, 2, 3, 4, - зменшується (рис. 4 г).

З рис. 5 добре видно, що гістограма для моделі цілі без покриття при носовому ракурсі спостереження має "протяжний" вид. Покриття окремих частин цілі РПМ призводить до зміни характеру гістограм.

Зменшується їх "протяжність" по осі абсцис і збільшується кількість вимірювань, які потрапили в область малих значень  $\sqrt{S_{ГТ}}$ , ( $0,03 \div 0,07$ ) м. При бічному ракурсі спостереження описана тенденція зберігається, але не є настільки вираженою.

## Висновки

При нанесенні на носову частину і на підставу цілі конічної форми РПМ відбувається спотворення пелюсткової структури реалізацій амплітуд відбитих від цих ділянок сигналів на основних і кросових поляризаціях при суміщеному прийомі, а також деяке зменшення значень амплітуд відбитих сигналів на основних поляризаціях. Використання РПМ розглянутого типу також призводить до істотного зниження ЕПР цілі в квазіоптичній області відображення радіохвиль при використанні вузькосмугового сигналу. Аналіз статистичних характеристик амплітуд відбитих від конуса сигналів (середнього значення і дисперсії), показав вплив розглянутого РПМ аналогічний впливу на реалізації даних амплітуд. Нанесення РПМ на окремі частини конуса також призводить до зменшення протяжності гістограм амплітуд відбитих сигналів на різних поляризаціях.

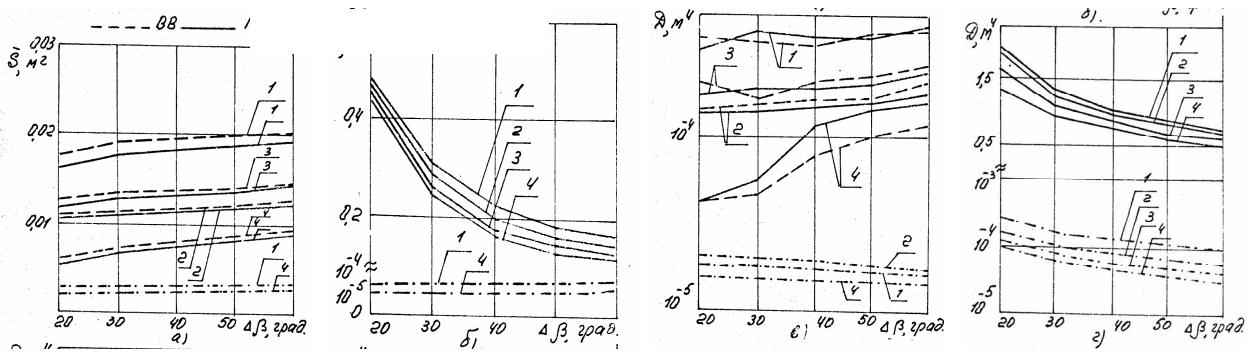


Рис. 4. Характер зміни середнього значення і дисперсії ЕПР основних і кросового амплітудних елементів ПМР

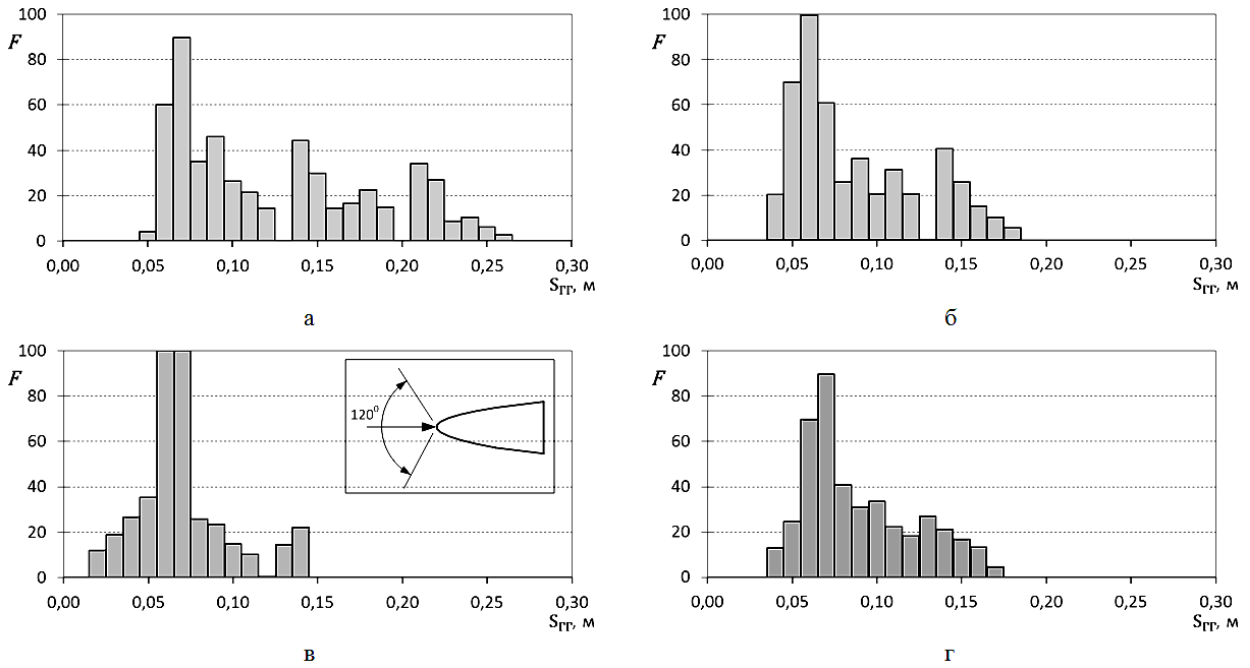


Рис. 5. Гістограми елемента  $S_{ГР}$  при носовому ракурсі спостереження

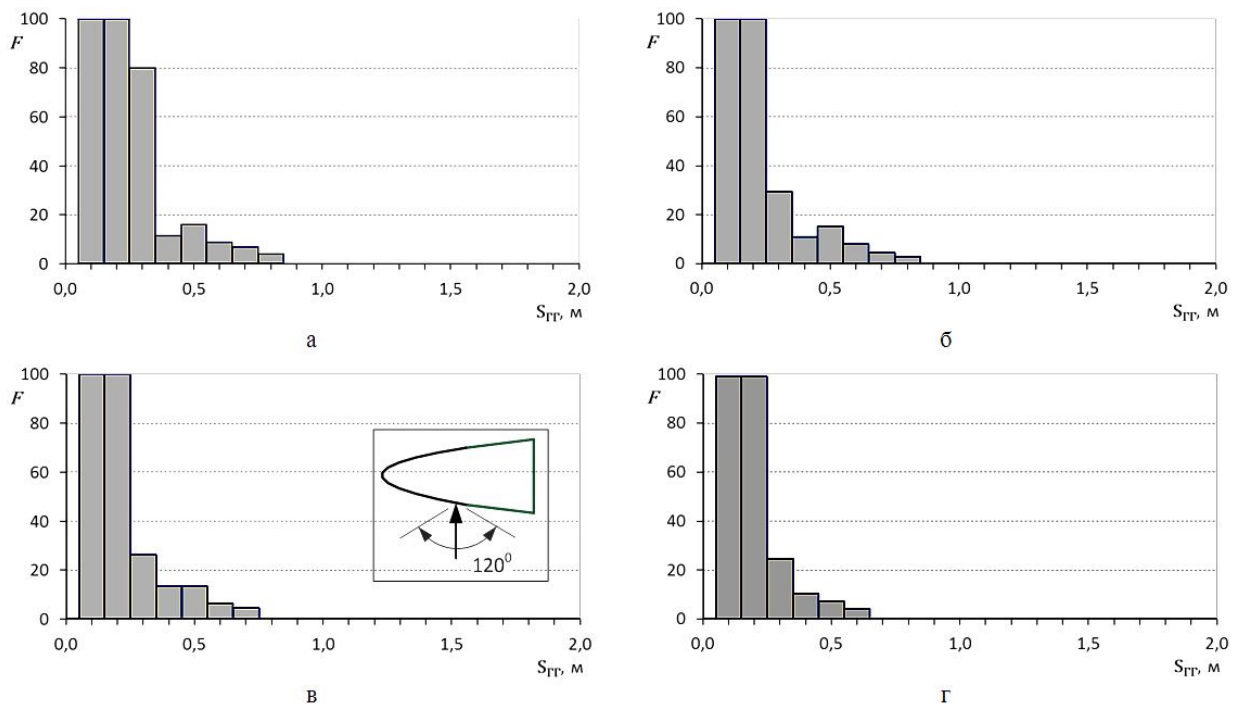


Рис. 6. Гістограми елемента  $S_{ГР}$  при бічному ракурсі спостереження

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Сов. радио, 1962. – 234 с.
2. Сиренко О.К., Сухаревский И.В., Сухаревский О.И., Яшин Н.П. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Под ред. О.К. Сиренко – Х.: Крок, 2000. – 242 с.
3. Блексмит мл., Хайатт Введение в методы измерения радиолокационного поперечного сечения цели. ТИИЭР. – 1965. – Т. 53. - №8. – С. 1055 – 1057..
4. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин др.; Под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1987. – 236 с.
5. Ягольщикова С., Сумнин А., Нестеров С. Опыт исследования "невидимок" // Военно-промышленный курьер. – 2004. – С. 105 - 115.
6. Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, В.Н. Решетник. Экспериментальное исследование поляризации-онно-рассеивающих свойств РЛЦ цилиндрической формы с поглощающими материалами. / Системы управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць – Х.: 2017. - Вип. 6 (46). - С. 37-41.
7. Распознавание целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев, К.В. Садовый; Под ред. Е.Л. Казакова. - КП "Городская типография", 2015. – 458 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. М. Биков,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків  
Received (Надійшла) 24.08.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

**Экспериментальное исследование поляризационно-рассеивающих свойств радиолокационной цели конической формы, покрытой радиопоглощающим материалом**

Е. Л. Казаков, А. Е. Казаков, В. М. Решетник

**Предметом** изучения в статье являются информация о характеристиках рассеяния РЛЦ при нанесении на нее РПМ для решения прикладных задач распознавания радиолокационных целей. **Целью** является получение экспериментальной оценки поляризационно-рассеивающей свойств радиолокационной цели конической формы на которой нанесен поглощающий материал магнитного типа. **Задачи:** уменьшение заметности и увеличения ошибок определения координат РЛЦ при нанесении на нее РПМ, оценка отражательных характеристик (характеристик рассеяния) различных типов РПМ, получение количественных значений характеристик рассеяния целей, покрытых РПМ, для узкополосных сигналов. Используемыми **методами** являются: математические модели оптимизации, методы решения матричных задач. Получены следующие **результаты**. Использование РПМ приводит к существенному снижению ЭПР цели в квазиоптической области отражения радиоволн при использовании узкополосного сигнала. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: При нанесении на носовую часть и на основание цели конической формы РПМ происходит искажение лепестковой структуры реализаций амплитуд отраженных от этих участков сигналов на основных и кроссовых поляризациях при совмещенном приеме, а также некоторое уменьшение значений амплитуд отраженных сигналов на основных поляризациях. Использование РПМ рассмотренного типа также приводит к существенному снижению ЭПР цели в квазиоптической области отражения радиоволн при использовании узкополосного сигнала. Анализ статистических характеристик амплитуд отраженных от конуса сигналов (среднего значения и дисперсии), показал влияние рассмотренного РПМ аналогично влиянию на реализации данных амплитуд. Нанесение РПМ на отдельные части конуса также приводит к уменьшению протяженности гистограмм амплитуд отраженных сигналов на разных поляризациях.

**Ключевые слова:** радиолокационная цель, поляризационная матрица рассеяния цели, поглощающий материал, узкополосный сигнал.

**Experimental study of the polarization of mono-scattering properties of the radar objective of the conic form covered with radio-absorbing material**

E. Kazakov, A. Kazakov, V. Rechetnik

The subject of the study is information on the characteristics of the radar scattering when applying an RPM to it to solve applied problems of recognizing radar targets. The goal is to obtain an experimental assessment of the polarization-scattering properties of a conical-shaped radar target on which a magnetic type absorbing material is applied. Tasks: reducing the visibility and increasing errors of determining the coordinates of the radar station when applying RPM to it, evaluating the reflection characteristics (scattering characteristics) of various types of RPMs, obtaining quantitative values of the scattering characteristics of targets coated with RPMs for narrow-band signals. The methods used are: mathematical optimization models, methods for solving matrix problems. The following results are obtained. The use of RPM leads to a significant decrease in the EPR of the target in the quasi-optical region of reflection of radio waves when using a narrow-band signal. Conclusions. The scientific novelty of the results obtained is as follows: When a conical RPM is applied to the nose and base of the target, the petal structure is distorted by the realization of the amplitudes of the signals reflected from these sections at the main and cross polarizations with combined reception, as well as a slight decrease in the amplitudes of the reflected signals at the main polarizations. The use of RPM of the considered type also leads to a significant decrease in the EPR of the target in the quasi-optical region of reflection of radio waves when using a narrow-band signal. Analysis of the statistical characteristics of the amplitudes of the signals reflected from the cone (average value and dispersion) showed the effect of the considered RPM similar to the effect on the implementation of these amplitudes. The application of RPM to separate parts of the cone also leads to a decrease in the length of the histograms of the amplitudes of the reflected signals at different polarizations.

**Keywords:** radar target, polarization target scattering matrix, absorbing material, narrowband signal.

В. Д. Карлов<sup>1</sup>, О. Л. Кузнєцов<sup>1</sup>, А. М. Артеменко<sup>2</sup>, А. Д. Карлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Генеральний штаб Збройних Сил України, Київ, Україна

## ТОЧНІСТЬ ОПТИМАЛЬНОГО ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЦІЛІ ПРИ ВРАХУВАННІ ФЛУКТУАЦІЙ ПОЧАТКОВИХ ФАЗ РАДІОІМПУЛЬСІВ ПАЧКИ

У статті розглядаються питання оцінювання радіальної швидкості при використанні когерентної пачки радіоімпульсів стосовно випадку наявності у відбитих від цілі радіоімпульсах корельованих флуктуацій початкових фаз. Оцінюється точність вимірювання частоти пачки для випадку оптимальної обробки з врахуванням фазових флуктуацій її радіоімпульсів. Розгляд проводиться у припущенні, що на вхід приймального пристрою РЛС надходить адитивна суміш відбитих від цілей сигналів й некорельованого гаусівського шуму. Оптимальне оцінювання доплерівського зміщення частоти відбитого від цілі сигналу здійснюється за критерієм максимуму натурального логарифма відношення правдоподібності усередненого по усім можливим значенням випадкових неінформативних параметрів. Вважається, що фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом з нульовим середнім, а кореляція фазових флуктуацій зі збільшенням інтервалу між радіоімпульсами пачки убуває за експоненціальним або знакозмінним законами.

**Ключові слова:** когерентно-імпульсна РЛС, пачка радіоімпульсів, фазові флуктуації, радіальна швидкість, гаусівський шум, відношення правдоподібності, оптимальне вимірювання, радіолокаційне спостереження, ефективність оптимізації.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Радіальна швидкість є важливим параметром руху цілі, який дозволяє визначати динаміку і напрямок її переміщення за результатом первинної обробки радіолокаційної інформації, а також обумовлює можливість і якість подальшої вторинної обробки та супроводження цілі.

В когерентно-імпульсних РЛС, які в якості зондувального сигналу використовують когерентну пачку радіоімпульсів, ступінь когерентності якої пачки визначає міру роздільної здатності РЛС за радіальною швидкістю та точність вимірювання радіальної швидкості повітряного об'єкта.

Турбулентність атмосфери призводить до флуктуацій показника її заломлення та до випадкових змін фазової структури сигналу. У тропосфері, дане явище обумовлене флуктуаціями температури, вологості і тиску [1, 2]. Рух реальної цілі приводить до зміни просторового положення складових її елементів і появи флуктуацій сумарного відбитого сигналу [3, 4]. При радіопеленгу повітряних об'єктів на малих висотах виникають фазові флуктуації прийнятого сигналу відбитих від нерівномірних ділянок місцевості [5, 6].

Вказане свідчить про необхідність оптимізації часо-частотної обробки когерентної пачки шляхом врахування флуктуацій фаз її радіоімпульсів. Оцінка точності вимірювання радіальної швидкості цілі за рахунок врахування фазових флуктуацій сигналу дозволить визначити умови доцільності вказаної оптимізації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Радіолокаційному спостереженню цілей та вимірюванню їх координат й параметрів руху в складних умовах присвячена значна кількість робіт. Так, в роботах [7-10] розглядаються питання оптимального оцінювання радіальної швидкості цілі при її локації

під малими кутами місця за наявністю спотворень фазової структури радіолокаційного сигналу.

Флуктуації фази, обумовлені наявністю атмосферних неоднорідностей та особливості застосування радіотехнічних систем в умовах їхнього впливу описані в роботах [1, 5, 9, 10]. Окрім цього, складна форма цілі та здатність її до виконання раптового маневру, обумовлює блукання її радіолокаційного центру та, як слід, появи фазових викривлень прийнятого сигналу та швидкісних шумів цілі [1, 3, 4]. Якщо радіолокаційне спостереження реалізується по цілям, що рухаються під малими кутами місця, та внаслідок багатотрасового поширення радіолокаційного сигналу з'являються його додаткові фазові викривлення, що розглядаються у [3, 5, 6].

Результати наведені у даних роботах стосуються випадку використання в якості зондувального сигналу РЛС або монохроматичного випромінювання або поодиноких радіоімпульсів.

В сучасних когерентно-імпульсних РЛС для забезпечення радіолокаційного спостереження складних маневруючих цілей використовується когерентна пачка радіоімпульсів. Тому, має практичну користь оцінювання потенційних можливостей оптимізації часо-частотної обробки прийнятої пачки з врахуванням фазових флуктуацій її радіоімпульсів.

Питання впливу корельованих фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу на зниження якості його часо-частотної обробки та вимірювання радіальної швидкості цілі розглядалися в роботах [11-14].

Результати оптимізації вимірювання частоти прийнятої пачки радіоімпульсів викладені в роботах [15-26].

**Метою статті** є дослідження впливу статистичних характеристик флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки на точність оптимального вимірювання радіальної швидкості цілі.

## Основний матеріал

Як показано в роботі [7], оцінювання радіальної швидкості цілі здійснюється згідно з виразом

$$V_r = \frac{\lambda}{4\pi} \Omega, \quad (1)$$

де  $\Omega = 2\pi F_d$  - циклічний доплерівський зсув частоти;  $F_d$  - частота Доплера;  $\lambda$  - довжина хвилі радіолокаційного сигналу.

Припускається, що прийнята реалізація представляє собою суму відбитої від цілі пачки радіоімпульсів та внутрішнього шуму приймального пристрою

$$y(t, \Omega) = x(t, \Omega) + n(t), \quad (2)$$

де  $y(t, \Omega)$  - реалізація прийнятого коливання;  $x(t, \Omega)$  - реалізація корисного сигналу;  $n(t)$  - реалізація внутрішнього гаусівського шуму.

Корисним сигналом є когерентна пачка радіоімпульсів з випадковою амплітудою і початковою фазою, комплексна амплітуда якої є такою

$$\dot{X}(t, \Omega) = b \sum_{i=1}^n \dot{X}_i(t, \Omega) \exp[j(\beta)], \quad (3)$$

де  $\dot{X}_i(t, \Omega)$  - комплексна амплітуда  $i$ -го радіоімпульсу;  $b$  - випадкова амплітуда радіосигналу, яка розподілена за законом Релея;  $\beta$  - випадкова початкова фаза радіосигналу, яка розподілена за рівномірним законом;  $i$  - номер радіоімпульсу, який відлічується від початку пачки;  $n$  - число радіоімпульсів в пачці.

В роботі [7] визначено, що відношення правдоподібності для когерентного сигналу з рівномірно розподіленою випадковою фазою й випадковою амплітудою, розподіленою за законом Релея, як результат статистичного усереднення за випадковими параметрами  $b$  і  $\beta$  має вид

$$\ell(\Omega) = \frac{1}{1 + \frac{q^2}{2}} \exp \frac{\frac{q^2}{2}}{2(1 + \frac{q^2}{2})} |Z_n(\Omega)|^2, \quad (4)$$

де  $q^2$  - відношення сигнал-шум за потужністю;  $|Z_n(\Omega)|^2$  - квадрат модулю нормованого комплексного вагового інтеграла як функція вимірюваного параметра.

В умовах регулярного вимірювання ( $q^2 \gg 1$ ) справедливою є рівність

$$|Z_n(\Omega)| = |Z_n(\vec{\Phi}_c, \vec{\Phi}_o)| \approx q\rho(\vec{\Phi}_c, \vec{\Phi}_o) = q\rho(\Omega), \quad (5)$$

де  $\vec{\Phi}_c = \|\Phi_{ci}\|^T$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) - вектор спостережуваних значень початкових фаз радіоімпульсів пачки;  $\vec{\Phi}_o = \|\Phi_{oi}\|^T$  - вектор очікуваних значень

початкових фаз радіоімпульсів пачки;  $\rho(\vec{\Phi}_c, \vec{\Phi}_o) = \rho(\Omega)$  - нормована функція розузгодження за початковою фазою спостережуваного та очікуваного радіосигналу.

З урахуванням (5) відношення правдоподібності (5) при  $q^2 \gg 1$  приймає вид

$$\ell(\Omega) \approx \frac{2}{q^2} \exp \frac{q^2 \rho^2(\Omega)}{2}. \quad (6)$$

Отримаємо вираз дисперсії помилки вимірювання частоти пачки  $\sigma_{\Omega_{\text{опт}}}^2$  при оцінюванні оптимальним алгоритмом.

В даному випадку комплексна амплітуда корисного сигналу може бути записана наступним чином

$$\dot{X}(t, \Omega) = b \sum_{i=1}^n \dot{X}_i(t, \Omega) \exp[j(\beta + \varphi_i)], \quad (7)$$

де  $\varphi_i$  - флукуаційна складова початкової фази  $i$ -го радіоімпульсу.

В роботі [7] визначено, що оптимальне вимірювання доплерівського зсуву частоти пачки радіоімпульсів здійснюється шляхом знаходження аргументу максимуму натурального логарифму усередненого за всіма випадковими параметрами відношення правдоподібності

$$\hat{\Omega}_{\text{опт}} = \arg \max \ln \bar{\ell}(\Omega), \quad (8)$$

Усереднене відношення правдоподібності знаходилося згідно виразу

$$\begin{aligned} \bar{\ell}(\Omega) &= \int \int \int \ell(\Omega/b, \beta, \bar{\varphi}) p(b) p(\beta) p(\bar{\varphi}) db d\beta d\bar{\varphi} = \\ &= \int \ell(\Omega) p(\bar{\varphi}) d\bar{\varphi}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\ell(\Omega/b, \beta, \bar{\varphi})$  - умовне відношення правдоподібностей при фіксованих випадкових неінформативних параметрах очікуваного радіосигналу;  $\bar{\varphi} = \|\varphi_i\|$  - вектор-стовпець значень флукуаційних складових початкових фаз радіоімпульсів пачки;  $p(b)$ ,  $p(\beta)$  і  $p(\bar{\varphi})$  - щільності імовірності випадкової амплітуди, початкової фази пачкового радіосигналу і вектора-стовпця  $\bar{\varphi}$  відповідно;  $\ell(\Omega)$  - відношення правдоподібності (6), як результат статистичного усереднення за випадковими параметрами  $b$  і  $\beta$ ;  $d\bar{\varphi} = (d\varphi_1 d\varphi_2 \dots d\varphi_n)^T$ .

Усереднене відношення правдоподібності (9) залежить від випадкових складових різниць фаз симетричних радіоімпульсів пачки і визначається як

$$\bar{\ell}(\Omega) = \int_{(\Delta\bar{\varphi})} \ell(\Omega, \Delta\bar{\varphi}) p(\Delta\bar{\varphi}) d\Delta\bar{\varphi}, \quad (10)$$

де  $\bar{\varphi} = \|\Delta\varphi_k\|$  - вектор-стовпець значень випадкових складових різниць фаз радіоімпульсів симетри-

чних відносно центру пачки;  $p(\Delta\varphi)$  - закон розподілу щільності імовірності;  $d\Delta\varphi = d\Delta\varphi_1 d\Delta\varphi_2 \dots d\Delta\varphi_m$ .

Вираз розподілу щільності імовірності випадкових складових різниць фаз симетричних радіоімпульсів пачки отримано в [7] явному вигляді. З урахуванням нього усереднене відношення правдоподібності можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{\ell}(\Omega) = K \int_{(\Delta\varphi)} \exp\left[-\frac{q^2}{2}(a_{1,1}\Delta\varphi_1^2 + a_{m,m}\Delta\varphi_m^2 + \right. \\ \left. + \sum_{k=2}^{m-1} a_{k,k}\Delta\varphi_k^2 + 2 \sum_{k=1}^{m-1} a_{k,k+1}\Delta\varphi_k\Delta\varphi_{k+1} + \right. \\ \left. + 2 \sum_{k=1}^m a_{k,m+1}\Delta\varphi_k\right] d\Delta\varphi_1 d\Delta\varphi_2 \dots d\Delta\varphi_m, \quad (11) \end{aligned}$$

де

$$K = \frac{2\sqrt{1+a}}{q^2(2\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi)^m(1-a^2)^{m/2}} \times \exp\left[\frac{q^2}{2}\left(1 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \xi_k \delta\Phi_k^2\right)\right]; a_{1,1} = \frac{1+a+a^2}{2\gamma(1+a)} + \frac{\xi_1}{2};$$

$$a_{m,m} = \frac{1}{2\gamma(1+a)} + \frac{\xi_m}{2}; a_{k,k} = \frac{1+a^2}{2\gamma(1+a)} + \frac{\xi_k}{2}$$

$$(k=2,3,\dots,m-1); a_{k,k+1} = a_{k+1,k} = -\frac{a}{2\gamma(1+a)};$$

$$a_{k,m+1} = a_{m+1,k} = \frac{1}{2} \xi_k \delta\Phi_k; \gamma = q^2 \sigma_\varphi^2 (1-a);$$

$$\delta\Phi_k = \Delta\Phi_k - (2k-1)\Omega T;$$

$k$  - номер пари радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки;  $\Delta\Phi_k$  - різниці фаз симетричних відносно центру пачки радіоімпульсів  $k$ -ї пари.

Параметр  $\gamma$  дозволяє одночасно враховувати вплив як внутрішніх шумів, так і корельованих фазових флуктуацій. Якщо вплив внутрішніх шумів переважає, то параметр  $\gamma$  приймає малі значення ( $\gamma \ll 1$ ), а якщо переважає вплив фазових флуктуацій, то даний параметр досягає значних величин ( $\gamma \gg 1$ ).

Із співвідношення (11) видно, що в показнику експоненти, яка знаходиться під знаком інтеграла, містяться елементи, які утворюють квадратичну форму  $m$  змінних  $\Delta\varphi$ .

Для того, щоб взяти цей інтеграл, необхідно перейти від довільного запису квадратичної форми до її канонічного. Тобто у співвідношенні (11) показник експоненти привести до:

$$-\frac{q^2}{2} \left( \sum_{k=1}^m \lambda_k y_k^2 + \frac{|\Delta|}{|\Theta|} \right), \quad (12)$$

де  $|\Theta|$  – визначник матриці  $\Theta$  коефіцієнтів при членах другого ступеня квадратичної форми;

$\bar{y} = \|y_k\|$  – нові змінні;  $\|\lambda_k\|$  – власні значення матриці  $\Theta$ , отриманої викреслюванням  $(m+1)$ -ої строки і  $(m+1)$ -го стовпця із матриці коефіцієнтів квадратичної форми  $\Delta$ , яка має такий визначник:

$$|\Delta| = \begin{vmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & 0 & \dots & 0 & a_{1,m+1} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \dots & 0 & a_{2,m+1} \\ 0 & a_{3,2} & a_{3,3} & \dots & 0 & a_{3,m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_{m,m-1} & a_{m,m} & a_{m,m+1} \\ a_{m+1,1} & a_{m+1,2} & \dots & a_{m+1,m-1} & a_{m+1,m} & 0 \end{vmatrix}$$

Використовуючи вираз (12), усереднене відношення правдоподібності (11) представляється як:

$$\begin{aligned} \bar{\ell}(\Omega) \cong K \exp\left(-\frac{q^2}{2} \frac{|\Delta|}{|\Theta|}\right) \times \\ \times \prod_{k=1}^m \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{q^2 \lambda_k y_k^2}{2}\right) dy_k. \quad (13) \end{aligned}$$

Враховуючи табличний інтеграл:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{q^2 \lambda y^2}{2}\right) dy = \sqrt{\frac{2\pi}{q^2 \lambda}}$$

і властивість власних значень  $\prod_{k=1}^m \lambda_k$ , отримаємо:

$$\bar{\ell}(\Omega) = K \prod_{k=1}^m \sqrt{\frac{2\pi}{q^2 \lambda_k}} \exp\left(-\frac{q^2}{2} \frac{|\Delta|}{|\Theta|}\right). \quad (14)$$

Якщо взяти натуральний логарифм виразу (14) і залишивши залежні від вимірюваного параметра елементи, отримаємо співвідношення для достатньої статистики:

$$\bar{S}(\Omega) = \frac{q^2}{2} \left( 1 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \xi_k \delta\Phi_k^2 \right) - \frac{q^2}{2} \frac{|\Delta|}{|\Theta|}. \quad (15)$$

Елементи  $(m+1)$ -ої строки і  $(m+1)$ -го стовпця матриці  $\Delta$  містять вимірюваний параметр. Використовуючи властивість визначника  $|\Delta|$  його можна записати в наступному вигляді:

$$|\Delta| = \sum_{k=1}^m a_{k,m+1} A_{k,m+1}, \quad (16)$$

де  $A_{k,m+1}$  – алгебраїчне доповнення елемента  $a_{k,m+1}$  матриці  $\Delta$ .

Для виділення  $\delta\Phi_k$  властивість (16) застосовується повторно до елементів  $(m+1)$ -ої строки матриці  $\Delta$ . Таким чином, формула для розрахунку визначника  $|\Delta|$  приймає вигляд:

$$|\Delta| = - \sum_{k=1}^m (-1)^k a_{k,m+1} \sum_{l=1}^m a_{m+1,l} (-1)^l |\Theta_{k,l}| =$$



$$-\frac{1}{4} \sum_{k=1}^m (-1)^k \xi_k \delta \Phi_k \sum_{l=1}^m (-1)^l \xi_l \delta \Phi_l |\Theta_{k,l}|, \quad (17)$$

де  $|\Theta_{k,i}|$  – мінор елемента  $k,i$  матриці  $\Theta$ .

З урахуванням (17) і (15) отримуємо вираз для достатньої статистики:

$$\bar{S}(\Omega) = \frac{q^2}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \sum_{k=1}^m \xi_k \delta \Phi_k^2 \left( 1 - \frac{1}{2|\Theta|} \xi_k |\Theta_{k,k}| \right) - \frac{1}{|\Theta|} \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l=k+1}^m (-1)^{k+l} \xi_k \xi_l \delta \Phi_k \delta \Phi_l |\Theta_{k,l}| \right] \right\}. \quad (18)$$

Для дисперсії  $\sigma_{\Omega}^2$  помилки вимірювання частоти пачки згідно [16] справедливе співвідношення

$$\frac{1}{\sigma_{\Omega}^2} = -\frac{d^2 \ln \bar{\ell}(\Omega)}{d\Omega^2} = -\frac{d^2 \ln \bar{S}(\Omega)}{d\Omega^2} \text{ при } \Omega = \hat{\Omega}, \quad (19)$$

де  $\ln \bar{\ell}(\Omega)$  - натуральний логарифм усередненого відношення правдоподібності або його достатньої статистики  $\bar{S}(\Omega)$ .

Вираз для дисперсії помилки оптимального вимірювання частоти пачки при врахуванні флуктуації фаз її радіоімпульсів, з використанням співвідношень (18) і (19), має вид

$$\frac{1}{\sigma_{\Omega_{\text{опт}}}^2} = \frac{T^2 q^2}{2} \left\{ \sum_{k=1}^m \xi_k (2k-1)^2 \left[ 1 - \frac{1}{2|\Theta|} \xi_k |\Theta_{k,k}| \right] - \frac{1}{|\Theta|} \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l=k+1}^m (-1)^{k+l} \xi_k \xi_l (2l-1)(2k-1) |\Theta_{k,l}| \right\}. \quad (20)$$

При переважному впливі аддитивного шуму  $\gamma \ll 1$  вираз (20) приймає вид

$$\frac{1}{\sigma_{\Omega_{\text{опт}}}^2} = \frac{q^2 T^2}{2} \sum_{k=1}^m \xi_k (2k-1)^2. \quad (21)$$

При переважному впливі корельованих фазових флуктуацій ( $\gamma \gg 1$ ), вираз (20) передворюється до виду (при  $m \geq 2$ )

$$\frac{1}{\sigma_{\Omega_{\text{опт}}}^2} = \frac{T^2 (1-a)(2m-1)}{2\sigma_{\phi}^2 (1+a)} \times \left[ \frac{(4(2m-1)^2 - 1)(1-a)^2 + (2m-1)(2m-3)a}{(1-a)^2} \right]. \quad (22)$$

На рис. 1 наданні графіки залежності добутку квадрата середньоквадратичної помилки оптимального вимірювання частоти пачки з десяти радіоімпульсів і періоду їх слідування  $(\sigma_{\Omega_{\text{опт}}} T)^2$ , отриманого згідно (22), від відношення сигнал-шум по потужності  $q^2$  (рис 1, а) та від дисперсії фазових флуктуацій (рис. 1, б) при експоненційному законі убування їх кореляції в межах пачки радіоімпульсів.

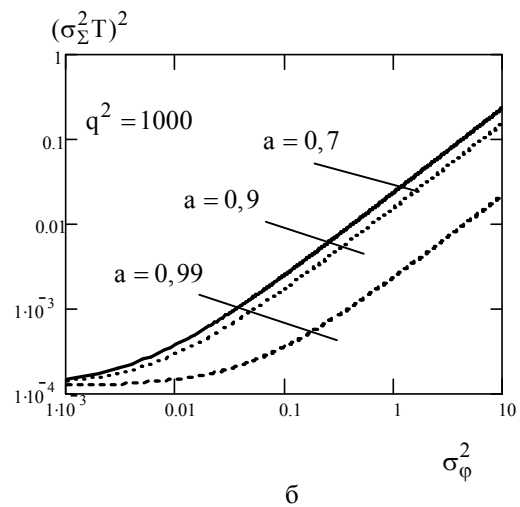
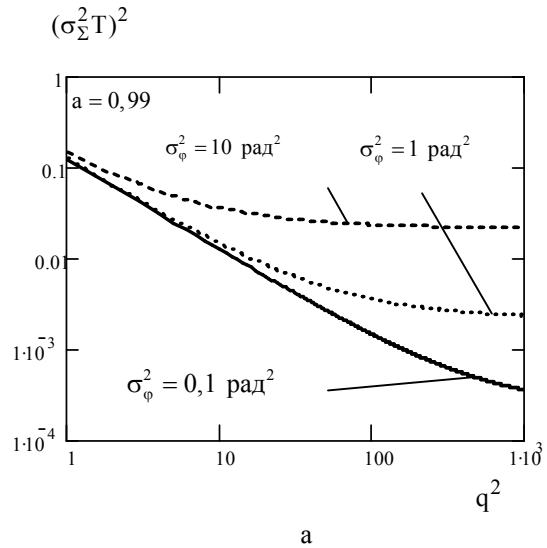


Рис. 1. Дисперсія помилки оптимального вимірювання частоти пачки радіоімпульсів при врахуванні фазових флуктуацій

Графіки на рис. 1, а відповідають значенню коефіцієнта міжімпульсної кореляції фазових флуктуацій  $a = 0,99$  та різним величинам їх дисперсії

$$\sigma_{\phi}^2 = 0,1; 1; 10 \text{ рад}^2.$$

Графіки на рис. 1, б одержані для відношення сигнал-шум за потужністю  $q^2 = 1000$  та трьох випадків зниження коефіцієнта міжімпульсної кореляції фазових флуктуацій на 1%, 10% та 30% ( $a = 0,99; 0,9; 0,7$ ).

Результати наведені на рис. 1, а свідчать про те, що при малих значеннях відношення сигнал-шум точність оптимального вимірювання частоти пачки радіоімпульсів не залежить від статистичних характеристик фазових флуктуацій, а в умовах регулярного вимірювання (при  $q^2 \gg 1$ ), навпаки, дані характеристики суттєво впливають на вказану точність.

Так, при зниженні коефіцієнта міжімпульсної кореляції фазових флуктуацій лише на 1% ( $a = 0,99$ ), збільшення їх дисперсії на порядок в області суттєвих значень ( $\sigma_{\phi}^2 = 1 \dots 10 \text{ рад}^2$ ), що є

характерним для реальних випадків, викликає до зростання дисперсії помилки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів в декілька разів.

Наведені на рис. 1,б результати чисельного оцінювання свідчать про те, що при вимірюванні частоти пачки радіоімпульсів врахування фазових флуктуацій є доцільним, якщо їх дисперсія приймає значення  $\sigma_{\phi}^2 = 0,1 \dots 10 \text{ рад}^2$  і більше. При цьому, на величину дисперсії помилки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів найбільш суттєвий вплив здійснює зменшення коефіцієнту міжімпульсної кореляції фазових флуктуацій в діапазоні 1...0,9 (зниження в межах 1...10%), яке може спостерігатися в при виконанні РЛС завдань за призначенням у складній цільовій та завадовій обстановці.

При переважному впливі адитивного шуму ( $\gamma \ll 1$ ), на величину дисперсії помилки вимірювання частоти не впливають значення статистичних характеристик фазових флуктуацій. Вказані особливості враховує структура виразу (21) за допомогою якого оцінюється точність вимірювання частоти при  $\gamma \ll 1$ .

При переважному впливі корельованих фазових флуктуацій ( $\gamma \gg 1$ ), основний внесок у точність вимірювання частоти вносять статистичні характе-

ристики фазових флуктуацій – дисперсія і кореляція. Ці особливості враховує структура виразу (22) за допомогою якого оцінюється точність вимірювання частоти при  $\gamma \gg 1$ .

При проміжних значеннях параметра  $\gamma$  на значення дисперсії помилки вимірювання частоти впливають як характеристики внутрішнього шуму приймального пристрою, так й значення статистичних характеристик фазових флуктуацій. В даному випадку оцінювання точності вимірювання частоти пачки радіоімпульсів доцільно проводити згідно виразу (20). Таким чином, отримані результати [27] дозволяють визначати значення параметра  $\gamma$  при якому доцільно застосовувати співвідношення (20-22).

### Висновки

При оптимальному оцінюванні, точність вимірювання радіальної швидкості цілі суттєво залежить від статистичних характеристик фазових флуктуацій – дисперсії і кореляції.

Ступінь впливу флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки може бути визначена величиною параметра  $\gamma = q^2 \sigma_{\phi}^2 (1 - a)$ , що визначає особливості їх врахування при обробці радіосигналу в когерентно-імпульсних РЛС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / под. ред. Я.Д. Ширмана. – М: МАКВИС, 1998. – 828 с.
2. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин – М: Сов. радио, 1970. – 383 с.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. – М: Сов. радио, 1976, Т 1. – 456 с.
4. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов – М: Радио и связь, 1982. – 232 с.
5. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк – М: Радио и связь, 1988. – 223 с.
6. Котов А.Ф. Влияние отражений от подстилающей поверхности на процесс локации объектов // Теория и практика систем синхронизации / Московский институт радиотехники электроники и автоматики. – М.: – 1992. – С.4-8.
7. Постановка задачі оптимального оцінювання радіальної швидкості цілі при врахуванні корельованих флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки / В.Д. Карлов, О.Л. Кузнецов, А.М. Артеменко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – Х: ХНУПС, 2018. – Вип. 3 (57) – С. 115-121.
8. Оптимальне вимірювання координат та параметрів руху цілі у когерентно-імпульсній РЛС при врахуванні фазових спотворень радіолокаційного сигналу / О.Л. Кузнецов, В.В. Белоусов, О.В. Лукашук, А.Д. Карлов // Збірник тез доповідей МНТК «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ» – Львів, 2019. – С. 233.
9. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем / В.Д. Карлов, А.К. Кондратенко, А.К. Шейгас, Ю.Б. Ситник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2014. – Вип. 1 (14) – С. 115-117.
10. К вопросу об измерении радиальной составляющей скорости аэродинамической цели при ее локации над морем / В.Д. Карлов, Г.В. Певцов, И.А. Нос, М.М. Петрушенко // Тези доповідей 11 науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» – Ф: 8-9 вересня, 2011. – С. 108.
11. Петрушенко М.М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометеорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах / М.М. Петрушенко // Системи управління навігації та зв'язку – К: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2009. – № 2 (10) – С. 54-57.
12. Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения цели, обусловленные неучетом флуктуаций фаз импульсов пачки / Н.Н. Минервин, А.Л. Кузнецов // АКГТ. – Х: ХАІ, 2001. – № 22 – С. 288-294.
13. Ограничение точности измерения радиальной скорости цели за счет условий распространения, отражения и обработки радиолокационного сигнала / М.М. Мінервін, О.Л. Кузнецов, В.А. Таршин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил – Х: ХУПС, 2006. – № 3(9) – С. 116-118.
14. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
15. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
16. Evaluation of the accuracy of measuring the radial velocity of a target with an exponential and alternating decrease in phase correlation of the burst radio signal / V.D. Karlov O.L., Kuznietsov, A.M. Artemenko // Новітні технології – для захисту повітряного простору. – Х: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 10 – 11 квітня, 2019. – С. 482.

17. Помилка вимірювання радіальної швидкості цілі внаслідок впливу флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів пачки / В.Д. Карлов, О.Л. Кузнецов, А.М. Артеменко, А.Д. Карлов // Системи управління навігації та зв'язку. – Полтава : Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2019. – Вип. 1(53) – С. 61-65.
18. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
19. 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.
20. 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.
21. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
22. 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)
23. 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.: ХУПС, 2013. – № 3(12). – С. 154-158.
24. Оптимальный алгоритм измерения несущей частоты пачки радиоимпульсов с учетом флуктуаций их начальных фаз и аддитивных шумовых колебаний / Н.Н. Минервин, А.Л. Кузнецов // Радиотехника – Х: ХДТУРЕ, 2001. – № 122 – С. 188-195.
25. Оптимальные алгоритмы измерения радиальной скорости цели и угла прихода принимаемого радиосигнала с учетом фазовых флуктуаций, описываемых произвольной корреляционной функцией / Н.Н. Минервин, А.Л. Кузнецов, И.Е. Шумейко, В.А. Таршин // Радиотехника – Х: ХНУРЕ, 2006. – № 145 – С. 84-88.
26. Оптимізація вимірювання частоти та її похідних за часом когерентної пачки радіоімпульсів / Кузнецов О.Л., Коломійцев О.В., Белоусов В.В., Черепньов І.А. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Мі-сroCAD-2019 у 5 ч. Ч. V. за ред. проф. Сокола Є.І. – Х: НТУ “ХПІ”, 15–17 травня, 2019. – С. 95.
27. Точність оптимального вимірювання радіальної швидкості цілі при врахуванні флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів пачки / В.Д. Карлов О.Л. Кузнецов, А.М.Артеменко // Тези доповідей XV МНК ХНУПС ім. І. Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору» 2019 року. – Х.: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 10 – 11 квітня, 2019. – С. 483.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л. Ф. Купченко,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 14.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.10.2019

#### Точность оптимального измерения радиальной скорости цели при учете флуктуаций начальных фаз радиоимпульсов пачки

В. Д. Карлов, А. Л. Кузнецов, А. Н. Артеменко, А. Д. Карлов

В статье рассматриваются вопросы оценивания радиальной скорости при использовании когерентной пачки радиоимпульсов применительно к случаю наличия в отраженных от цели радиоимпульсах коррелированных флуктуаций начальных фаз. Оценивается точность измерения частоты пачки для случая оптимальной обработки с учетом фазовых флуктуаций ее радиоимпульсов. Рассмотрение проводится в предположении, что на вход приемного устройства РЛС поступает аддитивная смесь отраженных от целей сигналов и некоррелированного гауссовского шума. Оптимальное оценивание доплеровского смещения частоты отраженного от цели сигнала осуществляется по критерию максимума натурального логарифма отношения правдоподобия усредненного по всем возможным значениям случайных неинформативных параметров. Предполагается, что фазовые флуктуации радиоимпульсов принятой пачки распределены по нормальному закону с нулевым средним, а корреляция фазовых флуктуаций с увеличением интервала между радиоимпульсами пачки убывает по экспоненциальному или знакопеременному законам.

**Ключевые слова:** когерентно-импульсная РЛС, пачка радиоимпульсов, фазовые флуктуации, радиальная скорость, гауссовский шум, отношение правдоподобия, оптимальное измерение, радиолокационное наблюдение, эффективность оптимизации.

#### Accuracy of optimal measurement of the target's radial velocity taking into account fluctuations of the radio pulse burst's initial phases

V. Karlov, O. Kuznietsov, A. Artemenko, A. Karlov

The article deals with the estimation of the radial velocity when using a coherent burst of radio pulses as applied to the presence of correlated fluctuations of the initial phases in the radio pulses reflected from the target. The accuracy of the measurement of the burst frequency is evaluated for case of optimal processing with taking into account the phase fluctuations of its radio pulses. The signals at the input of the radar's receiver is an additive mixture of signals reflected from the targets, and uncorrelated Gaussian noise, that is the assumption of investigating. The Doppler shifts of the signals' frequency reflected from the targets are carried out by the criterion of the natural logarithm maximum for likelihood ratio of the random non-informative parameters averaged over all possible values have been estimated. It is assumed, that the phase fluctuations of the received radio pulses bursts are distributed according to normal probability laws with zero mean, and correlations of phase fluctuations decrease with exponential or alternating, sign-variable laws by increasing interval between radio pulses within the bursts.

**Keywords:** coherent pulse radar, burst of radio pulses, phase fluctuations, radial velocity, Gaussian noise, likelihood ratio, optimal measurement, radar surveillance, optimization efficiency.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аркушенко П. Л.	7	Клочко А.	33	Панченко В. І.	51
Артеменко А. М.	118	Кобилін О. А.	45	Петрова Р. В.	45
Бабич О. О.	25	Козловська С. Г.	55	Погасій С.	72
Бахмат М. В.	108	Кононов В. Б.	22	Рагулін С. В.	3
Бондарев В. В.	108	Короткий Е. О.	25	Решетнік В. М.	113
Бреус Р. В.	29	Кузнєцов О. Л.	118	Рзаєв Х.	72
Бударецький Ю. І.	108	Куліченко В. В.	88	Сапельнікова О. Ю.	103
Вервейко О. І.	7	Кучук Н. Г.	51	Сироїжка І. О.	3
Вискребенцева С. О.	45	Кушнерук Ю. І.	22	Сірик М. Г.	84
Висоцький С. В.	55	Лаврут Т. В.	108	Скороделов В. В.	16
Гафіяк А. М.	33	Лада Н. В.	55	Сугак С. О.	84
Главчев Д. М.	11	Маковейчук О. М.	59	Тихенко О. М.	103
Головко Г. В.	36	Мамчур Ю. В.	95	Улічев О. С.	67
Горбуліч О. В.	88	Машков О. А.	95	Філоненко К. Д.	92
Горошко А. І.	40	Мезенцев М. В.	16	Флорін О. П.	7
Деркач Т. Н.	40	Мелешко Є. В.	67	Харламов І.	33
Дмитренко А. О.	40	Мілевський С.	72	Ходаковський О. В.	103
Дмитренко Т. А.	40	Мілов О.	72	Хох В. Д.	67
Жукаускас С. В.	95	Міхав В. В.	78	Чмихова О. В.	88
Захома В. М.	55	Міщенко А. О.	84	Шабанова-	
Заполовський М. Й.	16	Назаренко А. А.	22	Кушнарєнко Л. В.	84
Зиков І. С.	51	Науменко А. М.	25	Шефер О. В.	33
Казаків Є. Л.	113	Нігородова С. А.	95	Щапов П. Ф.	88
Казаків О. Є.	113	Нікіфорова К. М.	36	Яковлев М. Ю.	7
Карлов А. Д.	118	Ніколаєв К. Д.	103	Яковлев М. В.	92
Карлов В. Д.	118	Панова О. В.	103		

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 5 (57)

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 31.10.2019. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 15,5. Тираж 150 прим. Зам. 1031-19

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (066) 706-18-30

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.  
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.  
Запис № 2480000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34

e-mail: [bookfabrik@mail.ua](mailto:bookfabrik@mail.ua)