



Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"



Сучасні Інформаційні Системи

Advanced Information Systems

Sučasni informacijni sistemi

Том 6, № 3

Volume 6, No. 3

**Щоквартальний
науково-технічний журнал**

**Quarterly
scientific and technical journal**

Заснований у березні 2017 року

Founded in March 2017

У журналі публікуються результати досліджень з експлуатації та розробки сучасних інформаційних систем у різних проблемних галузях. Журнал призначений для наукових працівників, викладачів, докторантів, аспірантів, а також студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

The journal publishes the research study from the usage and development of advanced information systems in various problem areas. The journal is intended for researchers, lecturers, doctoral students, postgraduate students, and for senior students of the corresponding specialties.

Засновник і видавець:

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

Founder and publisher:

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Кафедра:

Комп'ютерна інженерія та програмування,
вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна

Department:

Computer Engineering and Programming,
61002, Ukraine, Kharkiv, Kyrpychova str., 2

Телефон: +38 (050) 302-20-71

Phone: +38 (050) 302-20-71

E-mail редколегії:

Heorhii.Kuchuk@khipi.edu.ua

E-mail of the editorial board:

Heorhii.Kuchuk@khipi.edu.ua

Інформаційний сайт:

<http://ais.khipi.edu.ua>

Information site:

<http://ais.khipi.edu.ua>

*Затверджений до друку Вченою Радою Національного технічного університету
"Харківський політехнічний інститут" (протокол від 01 липня 2022 року № 5).*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.

Включений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії" до категорії Б – наказом Міністерства освіти і науки України від 07.05.2019 № 612 (додаток 7, п. 33)

Харків • 2022

Редакційна колегія

Головний редактор:

СОКОЛ Євген Іванович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Заступник головного редактора:

ЗАКОВОРОТНИЙ Олександр Юрійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Члени редакційної колегії:

БАЙРАМОВ Азад Агахар огли
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Баку, Азербайджан*);

БЛАУНШТЕЙН Натан Шаєвич
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Беер-Шева, Ізраїль*);

ГНАТЮК Сергій Олександрович
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);

ЗАЙЦЕВА Єлена
(*д-р наук, проф., Жиліна, Словаччина*);

КАРПІНСЬКИЙ Микола Петрович
(*д-р техн. наук, проф., Бельсько-Бяла, Польща*);

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

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

ЛИТВІН Василь Володимирович
(*д-р техн. наук, проф., Львів, Україна*);

ЛУКІН Володимир Васильович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

МАМУЗИЧ Ілля
(*д-р техн. наук, проф., Загреб, Хорватія*);

МИГУШЕНКО Руслан Павлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

МОХАММЕД Амін Саліх
(*д-р наук, доц., Ербіль, Ірак*);

ОСТАПОВ Сергій Едуардович
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна*);

ПОВОРОЗНЮК Анатолій Іванович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

РАСКІН Лев Григорович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

САРАВАНА Балаї Баласубраманіан
(*PhD, доц., Ербіль, Ірак*);

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

СЕРКОВ Олександр Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

СМІРНОВ Олексій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Кропивницький, Україна*);

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

СТЕЦЬКО Юрій
(*канд. фіз.-мат. наук, Тампа, Флоріда, США*);

СУЧКОВ Григорій Михайлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

УШЕНКО Юрій Олександрович
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна*);

ФІЛАТОВА Ганна Євгенівна
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

ШВАЧИЧ Геннадій Григорович
(*д-р техн. наук, проф., Дніпро, Україна*);

ШИШАЦЬКИЙ Андрій Володимирович
(*канд. техн. наук, Київ, Україна*);

Відповідальний секретар:

ПОДОРЖНЯК Андрій Олексійович
(*канд. техн. наук, доц., Харків, Україна*).

Технічний секретар:

ГРЕБЕНЮК Дарина Сергіївна
(*магістр комп. інж., Харків, Україна*).

Editorial board

Editor-in-Chief:

Yevgen SOKOL
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Associate editor:

Oleksandr Zakovorotniy
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Editorial board members:

Azad Agalar oğlu BAYRAMOV
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Baku, Azerbaijan*);

Nathan BLAUNSTEIN
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Beer Sheva, Israel*);

Sergiy GNATYUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);

Elena ZAITSEVA
(*Dr. (Comp. Eng.), Prof., Zilina, Slovakia*);

Mikolay KARPINSKI
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Bielsko-Biala, Poland*);

Andriy KOVALENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

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

Vasyl LYTVYN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Lviv, Ukraine*);

Volodymyr LUKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Ilya MAMUZIĆ
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Zagreb, Croatia*);

Ruslan MYGUSHCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Amin Salih MOHAMMED
(*Dr. (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);

Serhii OSTAPOV
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);

Anatoliy POVOROZNYUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Lev RASKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Balasubramanian Balaji SARAVANA
(*PhD (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);

Serhii SEMENOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Aleksandr SERKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Alexey SMIRNOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kropyvnytskyi, Ukraine*);

Jonas STONKUNAS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Vilnius, Lithuania*);

Yuri STETSKO
(*PhD (Ph-Math.), Tampa, Florida, USA*);

Hryhorii SUCHKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Yuri USHENKO
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);

Hanna FILATOVA
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Viacheslav KHARCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Hennadii SHVACHICH
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Dnipro, Ukraine*);

Andrii SHYSHATSKYI
(*PhD (Tech.), Kyiv, Ukraine*).

Responsible secretary:

Andrii PODOROZHNIAK
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Technical secretary:

Daryna HREBENIUK
(*MSD of Comp. Eng., Kharkiv, Ukraine*).

З М І С Т

ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

- Гороховатський В. О.,
Творошенко І. С., Чмутов Ю. В.*
Застосування систем ортогональних функцій
для формування простору ознак
у методах класифікації зображень 5
- Хаханова Г. В.*
Векторний метод пошуку послідовностей
у великих даних 13

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Григоренко І. В., Григоренко С. М.,
Жук О. В.*
Використання дисперсійного аналізу
при побудові моделі факторного впливу
на результат дистанційного теплового
контролю біологічних об'єктів 23
- Раскін Л. Г., Іванчихін Ю. В.,
Сухомлін Л. В., Святкін Я. В.,
Корсун Р. О.*
Модель оцінки процесів відновлення
немарківських систем з урахуванням
ненадійності елементів за довільних
законів розподілу (eng.) 28

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Александров Є. Є., Александрова Т. Є.,
Костяник І. В., Моргун Я. Ю.*
Параметричний синтез електрогидравлічного
виконавчого органу цифрової системи
автоматичного керування
рухомим об'єктом (eng.) 36
- Юсубов Е., Бекірова Л.*
Розробка ієрархічної системи управління
з використанням метаевристичного
ПІД-регулятора для мікромереж
постійного струму (eng.) 42

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Искандаров Н.*
Вплив температури навколишнього
середовища на термодинамічні
вимірювання температури (eng.) 48
- Макогон О. А., Сірош В. С.,
Губа С. М., Лаврут, О. О.,
Загребельний С. М., Рудий А. В.*
Розробка методики оцінки витрати моторресурсу
двигуна 5ТДФ за різних режимах
роботи машини (eng.) 53

T A B L E O F C O N T E N T S

PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

- Volodymyr Gorokhovatskyi,
Iryna Tvoroshenko, Yuriy Chmutov*
Application of systems of orthogonal functions
for formation of sign space in image
classification methods (ukr) 5
- Hanna Khakhanova*
A vector method for finding sequences
in big data (ukr) 13

INFORMATION SYSTEMS MODELING

- Ihor Hryhorenko, Svitlana Hryhorenko,
Oleksandr Zhuk*
Use of dispersion analysis in building
a model of factor influence on the result
of remote thermal control
of biological objects (ukr) 23
- Lev Raskin, Yuriy Ivanchikhin,
Larysa Sukhomlyn, Iaroslav Svyatkin,
Roman Korsun*
Evaluation model of the recovery processes
of non-markovian systems, considering
the elements unreliability under arbitrary
distribution laws 28

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

- Eugene Aleksandrov, Tetiana Aleksandrova,
Iryna Kostianyk, Yaroslav Morgun*
Parametric synthesis of an electro-hydraulic
executive device of a digital
system of automatic control
of a moving object 36
- Elvin Yusubov, Lala Bekirova*
Development of an improved
hierarchical control system
using the metaheuristic PID tuner
for DC microgrids 42

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

- Nabi Iskandarov*
Effect of ambient temperature
on thermodynamic temperature
measurements 48
- Helen Makogon, Vitaliy Sirosh,
Serhiy Guba, Oleksandr Lavrut,
Sergiy Zagrebelnyy, Andriy Rudiy*
Development of the estimating methodology
of a 5TDF engine motor resource consumption
under different operating modes of the machine 53

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

Чалий С. Ф., Лещинський В. О.

Темпорально-орієнтована модель каузального відношення для побудови пояснень щодо процесу прийняття рішення (eng.) 60

МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

**Томашевський Б. П., Євсєєв С. П.,
Погасій С. С., Мілевський С. В.**

Механізми забезпечення безпеки каналів перспективної системи управління (eng.) 66

ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

**Дубницький В. Ю., Кобилін А. М.,
Кобилін О. А., Кушнерук Ю. І.,
Шевяков Ю. І.**

Обчислення значень функцій комплексної змінної з інтервальним аргументом, визначеним в гіперболічній формі 83

**Коломійцев О. В., Комаров В. О.,
Дмитрієв О. М., Пустоваров В. В.,
Олійник Р. М.**

Експериментальна установка для визначення ваги тіла космонавта та малої ваги об'єктів в умовах невагомості (eng.) 92

Петровська І. Ю., Кучук Г. А.

Метод статичного виділення ресурсів у хмарному середовищі з моделлю обслуговування IAAS (eng.) 99

Алфавітний покажчик 107

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi

Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process 60

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION

**Bogdan Tomashevsky, Serhii Yevseiev,
Serhii Pohasii, Stanislav Milevskyi**

Mechanisms for ensuring the security of channels of a prospective management system 66

APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION

**Valeriy Dubnitskiy, Anatolii Kobylin,
Oleg Kobylin, Yuriy Kushneruk,
Iurii Sheviakov**

Calculation of the value of the functions of the complex variable with by an interval argument, we will design in the hyperbolic form (ukr) 83

**Oleksii Kolomiitsev, Volodymyr Komarov,
Oleh Dmıtrıiev, Volodymyr Pustovarov,
Ruslan Oliinyk**

Experimental unit for determining body weight of astronauts and light-weight objects in zero-gravity conditions 92

Inna Petrovska, Heorhii Kuchuk

Static allocation method in a cloud environment with a service model IAAS 99

Alphabetical index 107

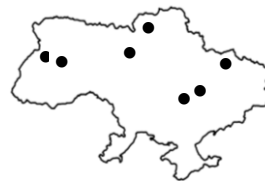


За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.

Географія статей цього номера



Азербайджан
Azerbaijan



Україна
Ukraine

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Александров Є. Є. (Eugene Aleksandrov)	36
Александрова Т. Є. (Tetiana Aleksandrova)	36
Бекірова Л. (Lala Bekirova)	42
Гороховатський В. О. (Volodymyr Gorokhovatskyi)	5
Григоренко І. В. (Ihor Hryhorenko)	23
Григоренко С. М. (Svitlana Hryhorenko)	23
Губа С. М. (Serhiy Guba).....	53
Дмитрієв О. М. (Oleh Dmitriiev)	92
Дубницький В. Ю. (Valeriy Dubnitskiy)	83
Євсєєв С. П. (Serhii Yevseiev)	66
Жук О. В. (Oleksandr Zhuk)	23
Загребельний С. М. (Sergiy Zagrebelnyu)	53
Іванчихін Ю. В. (Yuriy Ivanchikhin)	28
Іскандаров Н. (Nabi Iskandarov)	48
Кобилін А. М. (Anatolii Kobylin)	83
Кобилін О. А. (Oleg Kobylin)	83
Коломійцев О. В. (Oleksii Kolomiitsev)	92
Комаров В. О. (Volodymyr Komarov)	92
Корсун Р. О. (Roman Korsun)	28
Костяник І. В. (Iryna Kostianyk)	36
Кучук Г. А. (Heorhii Kuchuk)	99
Кушнерук Ю. І. (Yuriy Kushneruk)	83
Лаврут, О. О. (Oleksandr Lavrut)	53
Лещинський В. О. (Volodymyr Leshchynskyi)	60
Макогон О. А. (Helen Makogon)	53
Мілевський С. В. (Stanislav Milevskyi)	66
Моргун Я. Ю. (Yaroslav Morgun)	36
Олійник Р. М. (Ruslan Oliinyk)	92
Петровська І. Ю. (Inna Petrovska)	99
Погасій С. С. (Serhii Pohasii)	66
Пустоваров В. В. (Volodymyr Pustovarov)	92
Раскін Л. Г. (Lev Raskin)	28
Рудий А. В. (Andriy Rudiy)	53
Святкін Я. В. (Iaroslav Svyatkin).....	28
Сірош В. С. (Vitaliy Sirosh)	53
Сухомлин Л. В. (Larysa Sukhomlyn)	28
Творошенко І. С. (Iryna Tvoroshenko)	5
Томашевський Б. П. (Bohdan Tomashevsky)	66
Хаханова Г. В. (Hanna Khakhanova)	13
Чалий С. Ф. (Serhii Chalyi)	60
Чмутов Ю. В. (Yurii Chmutov)	5
Шевяков Ю. І. (Iurii Sheviakov)	83
Юсубов Е. (Elvin Yusubov)	42

Наукове видання

**Сучасні
інформаційні системи**

**Advanced
Information Systems**

Науковий журнал
Том 6, № 3

Відповідальний за випуск *О. Ю. Заковоротний*
Технічні редактори *Д. С. Гребенюк, А. П. Шиман*
Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.

Підписано до друку 15.07.2022 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 13,5. Тираж 100 прим. Зам. 715-22

Адреса редакції: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”
Кафедра ОТП, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна, тел. 707-61-65

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

Problems of identification in information systems

УДК 004.932.2:004.93*1

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.01>

В. О. Гороховатський, І. С. Творошенко, Ю. В. Чмутов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ОРТОГОНАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРУ ОЗНАК У МЕТОДАХ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Предметом досліджень статті є удосконалення структурних методів класифікації зображень у системах комп'ютерного зору. Метою є скорочення обчислювальних витрат на класифікацію шляхом впровадження апарату розкладання компонентів опису зображення за системою ортогональних функцій та впровадження моделей стиснення простору ознак. Застосовувані методи: детектор ключових точок ORB, апарат теорії множин і векторних просторів, метричні моделі для визначення релевантності щодо множин багатовимірних векторів, теорія ортогонального розкладання векторів, елементи теорії ймовірностей, програмне моделювання. Отримані результати: розроблено модифікації методу класифікації зображень на основі впровадження ортогонального розкладання даних у векторному просторі, запропоновано моделі для стиснення даних у трансформованому просторі ознак, введено метрику Танімото для зіставлення образів, встановлено спосіб вибору порогу для визначення еквівалентних компонентів опису. Результативність розроблених модифікацій класифікатора залежить від вибору підмножини функцій для розкладання, метрики для зіставлення описів, способу визначення порогу еквівалентності. Впровадженням апарату ортогональних функцій вдалося не тільки у десятки разів скоротити обчислювальні витрати, але і забезпечити достатньо високі показники результативності та завадостійкості класифікації. Практична значущість роботи – побудова нових моделей класифікатора зображень у трансформованому просторі ознак, підтвердження працездатності, швидкодії та завадостійкості запропонованих модифікацій на прикладах зображень, створення програмного застосунку для впровадження розроблених методів класифікації у системах комп'ютерного зору.

Ключові слова: комп'ютерний зір; структурні методи класифікації зображень; дескриптор ORB; ортогональне розкладання; функції Уолша; швидкодія оброблення; результативність класифікації.

Вступ

Формування продуктивної системи інформативних ознак задля забезпечення результативної класифікації зображень у комп'ютерному зорі є одним із ключових завдань теорії розпізнавання даних [1-5]. Найбільш пріоритетним напрямком новітніх досліджень є вивчення природи аналізованих даних з метою встановлення в їх складі наявних чи скритих закономірностей, наприклад, спільних чи відмінних характеристик, кластерів тощо [6, 7], і впровадження отриманих знань у процес розпізнавання [8-10].

У той же час розвивається інша група методів, у яких аналіз базується на проектуванні довільних вхідних даних на фіксований простір ортогональних функцій і використанні значень отриманих проєкцій як ознак для розпізнавання [1-3]. Такі методи носять суто формалізований характер і здатні у відповідності до встановленої процедури універсально опрацьовувати будь-які дані у заданому просторі. Ефективність цих підходів залежить від ступеня розподільної здатності вибраної системи функцій стосовно аналізованих даних [6, 11].

Часто при опрацьованні систем функцій стосовно заданої бази ознак зображень є можливість дещо скоротити повну множину елементів розкладання з метою створення підмножини, що задовольняє потребам продуктивної класифікації. У такому випадку пропорційно ступеню скорочення вдається досягти і суттєвого зменшення обчислювальних затрат за рахунок стиснення модифікованого простору ознак [4].

Для методів класифікації на підставі розкладання базова множина для проектування аналізованих описів зображень уже задана, тому їй не треба формувати у процесі навчання класифікатора. Технологія навчання тут може полягати як у адаптації до еталонної інформації, так і у формуванні ефективною підмножини, яка дає можливість у заданий часовий діапазон здійснювати результативну класифікацію [12, 13, 27, 28].

У структурних методах класифікації образ об'єкта подається скінченною множиною векторів, що є дескрипторами ключових точок (КТ) зображення [15- 18]. Варіант ефективного подання може бути пов'язаний із перетворенням образу, тобто наявної множини дескрипторів, до ортогонального простору. Прикладний інтерес через достатньо просту програмну та апаратну реалізацію має застосування системи функцій Уолша (ФУ) та перетворень, пов'язаних з ними [1, 4, 14, 22]. Впровадження кусково-постійних базисних функцій Уолша характеризується незначними обчислювальними затратами, так як не пов'язано з діями множення і реалізується у просторі цілих чисел.

Система функцій Уолша (Адамара) дає можливість здійснити розкладання вхідного сигналу (окремо кожного дескриптора КТ) за сімейством прямокутних базисних функцій. Отримана множина цілочисельних векторів-ознак є ґрунтовною підставою для побудови класифікатора.

Мета роботи – удосконалення структурних методів класифікації зображень в аспекті скорочення

обчислювальних витрат шляхом впровадження апарату розкладання компонентів опису за системою ортогональних функцій та застосування моделей стиснення простору ознак.

Завдання дослідження полягають у здійсненні ортогонального розкладання еталонних та вхідних образів, побудові метричного класифікатора у трансформованому просторі ознак, визначення параметрів порогу для еквівалентності компонентів опису у різних метриках, вивчення результативності розроблених модифікацій класифікаторів (працездатності, швидкодії, завадостійкості) шляхом імітаційного моделювання.

Подання опису у ортогональному базисі та класифікація

У просторі структурних ознак опис $Z = \{z_i\}_{i=1}^s$ зображення маємо як скінченну множину із s векторів z_i , $s = \text{card } Z$, $z_i \in B^n$, $z_i = \{z_{i,j}\}_{j=1}^n$, B^n – векторний простір розмірності n з бінарними компонентами $\{0,1\}$ [15]. Дескриптор КТ зображення тут можна розглядати як точку n -мірного дискретного сигналу. Зважимо на те, що у будь-якому скінченному векторному просторі існує хоча б одна ортогональна система векторів $W = \{w_{j,b}\}_{j=1}^n$, така, що будь-який вектор $z \in B^n$, $z = \{z_b\}_{b=1}^n$ може бути поданий у ній кортежем коефіцієнтів $\alpha = \{\alpha_j\}_{j=1}^n$, де

$$\alpha_j = (z \cdot w_j) = \sum_{b=1}^n z_b w_{j,b}. \quad (1)$$

Кожний коефіцієнт (1) визначається як скалярний добуток вектору z на вектор w_j ортогональної системи [14-16]. Коефіцієнти α_j називають координатами вектору у базисі W . Для кожного $z_i \in Z$ таким способом отримаємо значення вектору розкладання α_i . Із впровадження математичної моделі векторного простору до класифікації впливає, що будь-який дескриптор $z_i \in Z$ образу зображення можна обернено єдиним способом подати як лінійну комбінацію базисних векторів, а вибраний базис складає при цьому точно n векторів, тобто

$$z_i = (\alpha_i \cdot w_j) = \sum_{b=1}^n \alpha_{i,b} w_{j,b}. \quad (2)$$

Зауважимо, що у n -вимірному просторі векторів теоретично існує множина різних ортогональних базисів [1, 14].

Зважаючи на те, що ФУ формально приймають значення $\{1, -1\}$ та безпосередньо не входять у векторний простір B^n , перетворення (1) фактично відображає трансформацію $B^n \rightarrow C^n$ у простір C^n векторів з цілими компонентами. У той же час простір $B^n \subset C^n$ є підпростором для простору C^n , тому із загальних позицій можна вважати, що перетворення (1), (2) здійснюються у просторі C^n . Коефіці-

єнт нормування для ФУ до ортонормальної системи, який забезпечує зворотність перетворень (1), (2), є константою при заданому n , тому при обчисленнях його можна не враховувати.

У результаті застосування по-елементної трансформації $z_i \rightarrow \alpha_i$ опис Z отримає вид $\alpha(Z) = \{\alpha_i\}_{i=1}^s$, тобто множина $\{z_i\}_{i=1}^s$, $z_i \in B^n$, дескрипторів КТ трансформується у множину векторів $\{\alpha_i\}_{i=1}^s$, $\alpha_i \in C^n$, тієї ж розмірності та чисельності. Множину α_i називають розподіленням потужності сигналу z_i [1, 21]. Виникає питання про результативність здійснення такої трансформації для подання даних у новому просторі ознак при здійсненні класифікації зображень.

Векторні простори B^n, C^n відносять до евклідових, де для будь-якого вектору z можна ввести норму

$$\|z\| = \sqrt{(z \cdot z)} = \sqrt{\sum_{j=1}^n z_j z_j}, \quad (3)$$

а наявність поняття скалярного добутку дає можливість визначити кут між векторами y, z як

$$\cos \varphi = \frac{(y \cdot z)}{\|y\| \cdot \|z\|}. \quad (4)$$

Вираз (4) наряду із визначенням метрики $\rho(y, z)$ для векторів часто використовують у системах розпізнавання даних [5, 11, 12], при цьому виконується умова $|\cos \varphi| \leq 1$. Квадрат норми (3) у просторі B^n відповідає числу одиничних бітів.

Перетворення (1), (2) також можна записати у векторній формі. Застосуємо розкладання опису у базисі сімейства прямокутних базисних функцій – дискретних ФУ, які є векторами цілих чисел (значення $+1, -1$) скінченної розмірності (як правило – степінь двійки). Повний набір ФУ розмірності n утворює ортогональну матрицю Адамара A розміром $n \times n$, яка складається із n векторів ФУ w_1, \dots, w_n . Наприклад, матриця Адамара при $n = 4$ має вигляд:

$$A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

де коефіцієнт $\frac{1}{2}$ забезпечує властивості ортонормальності і оберненості перетворення.

Матриці A довільного розміру формуються рекурентною процедурою кронекерівського добутку із матриць меншого розміру, в результаті породжується матриця блочної структури [21]. Матриці Адамара мають ще ряд інших прикладних властивостей і часто використовуються при обробленні дискретних сигналів та зображень [3, 22].

У той же час аналізований опис Z як множину дескрипторів КТ можна розглядати як прямокутну матрицю $Z = \{z_{i,j}\}$, $i = \overline{1, s}$, $j = \overline{1, n}$ розміром $s \times n$, рядки якої містять s дескрипторів опису. Перетво-

рення опису Z тепер можна подати як множення прямокутної та квадратної матриць

$$U = Z * A. \quad (5)$$

У результаті множення (5) отримаємо прямокутну матрицю $U = \{u_{i,j}\}, i = \overline{1,s}, j = \overline{1,n}$ розміром $s \times n$, рядки якої містять вектори розкладання α для дескрипторів опису Z . Зважаючи на те, що у нашому дослідженні набір ФУ розглядається і застосовується у повному складі, ми не будемо аналізувати різноманіття способів упорядкування систем ФУ (Уолш, Адамар, Пелі, Трахтман та ін.), кожна з яких має ряд своїх властивостей і відповідні сфери прикладного застосування [1].

Традиційний метод класифікації полягає у встановленні ступеня релевантності $\Theta(Z, E_k)$ між описом $\{z_i\}_{i=1}^s$ аналізованого зображення та складових компонентів $E_k = \{e_i(k)\}_{i=1}^s$ бази $E = \{E_k\}_{k=1}^N$ еталонних описів [15, 20, 23]. Клас m об'єкта визначається відповідно до екстремуму функції $\Theta(Z, E_k)$ як

$$m = \arg \underset{k=1, \dots, N}{extr} \Theta(Z, E_k). \quad (6)$$

Після здійснення трансформації порівнюваних описів процес класифікації буде базуватися на визначенні ступеня релевантності $\Theta^\alpha(\alpha(Z), \alpha(E_k))$ для трансформованих описів $\alpha(Z)$ та $\alpha(E_k)$ у новому просторі ознак. Кожний із перетворених описів є множиною векторів із компонентами із C^n або у редукованому просторі C^α . Зважаючи на обмежений діапазон значень вхідного сигналу та фіксоване перетворення у просторі цілих чисел, при побудові класифікатора є можливість оцінити діапазон значень функцій Θ та Θ^α і використати ці знання для класифікації.

Одним із варіантів Θ чи Θ^α є метрика для множин векторів. Це може бути відстань Хаусдорфа як міра релевантності для двох множин A, B однотипних векторів [5, 13]

$$X(A, B) = \max \left\{ \max_{a \in A} \rho(a, B), \max_{b \in B} \rho(b, A) \right\}, \quad (7)$$

де $\rho(a, B) = \min_{b \in B} \rho(a, b)$, а $\rho(a, b)$ – метрика у векторному просторі (наприклад, відстань Хемінга для бінарних даних із B^n чи манхетенська відстань для C^n, C^α). Значення міри (7) є відстань між двома спеціально обраними точками множин.

Іншим варіантом оцінювання релевантності є відстань Танімото (Жаккара) для множин, яка означає відношення числа елементів симетричної різниці та об'єднання множин

$$T(A, B) = \frac{\text{card}(A \Delta B)}{\text{card}(A \cup B)}. \quad (8)$$

Міра (8) на відміну від (7) відображає кількісні характеристики еквівалентних та відмінних елементів порівнюваних множин.

При застосуванні метрики (8) важливим є її граничне значення, для якого елементи векторного простору вважаються еквівалентними [10, 15, 16]. Ця проблема є однією із ключових у багатовимірних просторах даних. Вибір порогу суттєвим чином впливає на результат класифікації.

Для її вирішення запропонуємо два способи. Один із них визначає граничне значення

$$\rho_{\lim}(a, b) = \alpha \rho_{\max}(a, b) \quad (9)$$

як відсоток α від максимально теоретично визначеного значення метрики. Наприклад, для метрики Хемінга, що у даному випадку змінюється на інтервалі $[0, 256]$, при відсотку у $\alpha = 25\%$ можна визначити $\rho_{\lim}(a, b) = 0,25 * 256 = 64$.

Більш практичним є спосіб, що визначає $\rho_{\lim}(a, b)$ за результатом аналізу конкретних експериментальних даних, де ρ_{\max} обчислюється для фіксованого набору описів еталонів. Час обчислення ρ_{\max} не впливає на витрати для класифікації і здійснюється на попередньому етапі аналізу даних.

Будемо оцінювати продуктивність методу класифікації показником точності pr , який обчислюється відношенням числа правильно класифікованих об'єктів r_p до загального їх числа r , що використовувалося в експерименті [5]

$$pr = r_p / r. \quad (10)$$

Важливим показником результативності методів розпізнавання зображень також є завадостійкість. Вона характеризується значенням точності класифікації в умовах дії завад [16, 22, 27]. Якщо дія адитивної завади на зображення $B(x, y)$ описується моделлю

$$B_\xi(x, y) = B(x, y) + \xi(x, y), \quad (11)$$

а завада $\xi(x, y)$ характеризується середньоквадратичним відхиленням σ , то відношення сигнал-шум можна описати як $\mu = B_m / \sigma$, де B_m – амплітудна характеристика (наприклад, середнє значення яскравості). Важливим є вивчення залежності $pr(\mu)$ для розробленого методу.

Редукція простору ознак

Зважаючи на те, що визначення трансформованої системи ознак засновано на інтеграційному процесі розкладання даних вхідного опису за спектром ортогональних проєкцій, у новому просторі C^{n_z} являється можливість формування компактного подання $\alpha^*(Z)$ та $\alpha^*(E_k)$ зі стисненим об'ємом коефіцієнтів.

Стиснення розмірності простору даних реалізує перспективну ідею скорочення обсягу обчислень для значення релевантності Θ^α шляхом зменшення розміру вектору ознак і задля зменшення часу класифікації загалом [1, 7, 26]. Таке оброблення набуло популярності у спектральних методах, де шляхом

фільтрації незначущих компонентів спектру за рахунок деякого збільшення помилки відновлення сигналу зменшують надмірність представлення та скорочують вектор оброблюваних даних [21]. При цьому показники функціонування систем знижуються незначним чином.

Один із традиційних способів полягає у відборі серед множини $\{\alpha_i\}_{i=1}^s$ найбільш інформативної її підмножини $\{\alpha_i\}_{i=1}^q$, $q \ll s$, що в той же час забезпечує достатньо якісну класифікацію. При цьому формування стисненої підмножини $\{\alpha_i\}_{i=1}^q$ дає можливість відібрати компактну частину серед функцій ортогональної системи W , тобто використати для класифікації лише деяку підмножину W_q із W , $W_q \subset W$. У такому випадку відпадає необхідність формування повної системи коефіцієнтів розкладання як для вхідного образу, так і для еталонної множини E .

Таке ж саме оброблення можна було б спробувати здійснити і безпосередньо для вхідної множини $\{z_i\}_{i=1}^s$ ознак, наприклад, за встановленим критерієм інформативності [3-5]. Однак таке безпосереднє скорочення часто призводить до суттєвих втрат інформації прямо пропорційне кількісному скороченню опису. У той же час обчислені проєкції $\{\alpha_i\}_{i=1}^s$ не тільки мають багатоспектральний сенс даних, але і містять у більшій мірі інтегровану інформацію за рахунок процесу розкладання (1) за системою базисних функцій, тому можуть бути успішно покладені в основу здійснення ефективного стиснення даних.

Таким чином, якщо введеною процедурою фільтрації вдасться відібрати високоінформативну частину спектру, яка забезпечує достатньо якісну класифікацію, то за рахунок цього можна суттєво скоротити обчислювальні затрати на класифікацію із забезпеченням необхідного рівня результативності.

Отримана в результаті такого секвестрування підмножина найбільш інформативної частини спектру ФУ є результатом навчання на заданій множині еталонних сигналів, її формування безпосередньо залежить від аналізованого простору даних і адаптоване до нього.

Для інших варіантів колекцій еталонних даних підмножина компонентів спектру може мати зовсім інший склад.

Поставимо задачу шляхом трансформації у новий простір на основі побудови відображення $T: \alpha(Z) \rightarrow \alpha^*(Z)$, або фактично $T: W \rightarrow W_q$, за рахунок застосування ортогонального розкладання за компактною системою W_q ФУ сформувати стиснені інформативні описи $\alpha^*(Z)$ та $\alpha^*(E_k)$, що забезпечують достатні показники результативності класифікації. Таке відображення $T = T(E, W)$ є функцією як еталонних даних E , так і виду ортогональної системи функцій W .

Способи побудови компактного опису

Внаслідок наявності значних кореляційних зв'язків між елементами зображення реальної природи, що знаходить своє відтворення у значеннях дескрипторів КТ, основна енергія у дискретному спектрі має тенденцію концентруватися у відносно невеликій кількості відліків, що відповідають повільно осцилюючим базовим функціям. Тому без істотної шкоди для відновлення чи класифікації зображення невеликі за величиною спектральні коефіцієнти можна взагалі обнулити (або відкинути їх аналіз), а значущі елементи спектру використовувати у процесі розпізнавання [21].

Дисперсійний аналіз обчислених коефіцієнтів ортогонального перетворення є на сьогодні основним апаратом для оцінювання їх значущості у моделі подання сигналу (1) [1, 24, 27], так як середньоквадратична помилка відновлення залежить від дисперсійних характеристик. Тому природним критерієм для вибору множини значимих коефіцієнтів розкладання є найбільше значення дисперсії. Як правило, обчислюють криву нормованих значень дисперсій в залежності від номера ФУ, розміщених за спаданням, і впроваджують у процес класифікації підмножину коефіцієнтів з найбільшими значеннями.

Застосування цього апарату в задачі класифікації, де описи зображень подано множиною дескрипторів, має свої особливості та можливості [4]. Справа в тому, що не завжди коефіцієнти з найбільшими дисперсіями забезпечують потрібний рівень розрізнення вхідних зображень. Другим фактором є можливість здійснення дисперсійного аналізу даних як у рамках повної бази еталонів, так і в межах окремих її представників, що може покращити результативність. Ще однією можливістю є організація дисперсійного аналізу в рамках системи фрагментів дескрипторного опису, що реалізує віконне оброблення [9, 25].

На повній множині даних E для описів еталонів отримуємо матрицю (5) розміром $N_s \times n$, обчисливо для кожного стовпця матриці U вектори математичного очікування Mu_i та дисперсії σ_i^2

$$Mu_i = \frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} u_{i,j},$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N_s - 1} \sum_{j=1}^{N_s} (u_{i,j} - Mu_i)^2. \quad (12)$$

При визначенні показників (12) для окремого еталону треба взяти $N = 1$. На основі отриманих дисперсійних характеристик можна побудувати класифікатор, аналогічний класифікатору за значенням дисперсій безпосередньо для множини дескрипторів опису Z .

Здійснимо ранжирування списку ФУ w_i за значенням дисперсії σ_i^2 для окремих компонент спектру: w_1, w_2, \dots, w_n , так щоб була виконана умова $\sigma_1^2 \geq \sigma_2^2 \geq \dots \geq \sigma_n^2$ спадання значень.

Покладемо отриманий список в основу процедури стиснення.

Результати комп'ютерного моделювання

Для вивчення продуктивності запропонованих методів класифікації (працездатність, швидкодія, завадостійкість) проведено комп'ютерне моделювання. Для дослідження обрано базу із п'яти еталонних зображень гербів футбольних клубів. Зображення мають розмір 325×325 пікселів (формат JPEG). Окремий візуальний об'єкт (еталон) розташовується на світлому фоні (рис. 1).



Рис. 1. Еталонні зображення:
a-e – еталони; f – координати ORB-дескрипторів
(Fig. 1. Standard images:
a-e – etalons; f – coordinates of ORB descriptors)

Із застосуванням системи програмування Python та бібліотеки алгоритмів комп'ютерного зору OpenCV [25] сформовано 500 дескрипторів ORB розміром 256 біт для кожного зображення.

На рис. 2 наведено значення перетворення одного із дескрипторів з використанням ортогонального перетворення за системою ФУ. Експерименти показали, що відстань Хаусдорфа між еталонними описами з дескрипторами у бітовому виді знаходиться у вузькому інтервалі значень $[95, \dots, 100]$ (між дескрипторами – відстань Хемінга). Відстань Хаусдорфа з поданням у просторі ФУ – в інтервалі цілих значень $[1960, \dots, 2034]$ (між трансформованими дескрипторами – відстань Манхетена).

```
132, 4, 14, -2, -8, -4, 6, -6, 0, 8, 2, 10, -4, -16, 2, 6, -8, -8,
14, -2, 0, 4, 2, -10, -8, 8, -18, -2, 8, 4, -6, 6, 2, 2, 4, 12, 6,
10, -4, -8, 2, 10, -4, 12, -10, 10, 4, 0, 2, 10, -8, -8, 18,
-18, 4, 8, 14, -10, 4, 4, -2, 2, 0, -4, 8, 12, 2, -10, 0, 8, 6,
-2, 0, -12, 2, 6, -8, -8, -10, -10, -4, -8, 2, -2, 0, -16, -6, 10,
-8, -4, -2, 2, -4, -4, -10, 6, -10, -6, -8, -12, 6, -2, 4, 4, 2,
-10, -4, -8, -6, 10, 0, -8, 6, 10, 12, 8, -6, 18, 4, 4, -2, -6,
-12, -8, 10, 2, 4, 4, -2, 22, 4, 4, -6, -2, -4, 8, 2, -6, -24, -8,
-2, -6, 0, 4, 18, -6, 4, -12, 2, 6, -8, 4, -14, 2, -4, 4, 2, 6, 0,
12, 0, 8, -2, -26, -4, 0, -10, 10, 0, -8, -2, -10, 4, -16, -2,
10, 0, 0, 2, -14, -8, -12, -2, -6, -12, -4, 14, 6, 4, 0, 18, -2,
-2, -6, -4, 0, 6, -2, -8, -8, -2, -14, -4, -8, -2, 6, 0, 0, 10,
-18, 4, 0, -2, -2, -12, 12, 6, -6, 8, -12, 18, -6, -16, 0, 8, 4,
-18, -6, 8, 0, 2, -6, 4, 8, -6, -2, 4, -4, -2, -10, 16, -4, -6,
-10, 4, -4, 10, 2, 0, -4, 2, -2, 4, 4, 2, 2
```

Рис. 2. Приклад перетворення дескриптора за множиною 256 функцій Уолша
(Fig. 2. Butt conversion of the descriptor for a multiplier of 256 Walsh functions)

Як бачимо, діапазон значень трансформованих даних обмежений, що дає можливість здійснити якісну класифікацію.

Табл. 1 містить номери перших 16-ти відсортованих ФУ за величиною квадрату дисперсії на множині дескрипторів бази еталонів рис. 1.

Таблиця 1 – Номери відсортованих ФУ

№	№ФУ	Нормована дисперсія
1	0	1.0
2	45	0.00159
3	106	0.00157
4	208	0.00156
5	176	0.00145
6	10	0.00134
7	85	0.00128
8	77	0.00123
9	109	0.00122
10	80	0.00119
11	209	0.00119
12	9	0.00115
13	3	0.00113
14	54	0.00107
15	72	0.00107
16	197	0.00105

Відстань Хаусдорфа з поданням у просторі 16 відібраних ФУ – в інтервалі цілих значень $[126, \dots, 146]$ (між трансформованими дескрипторами – відстань Манхетена). При цьому комп'ютерний час для обчислення метрик склав 21, 29 та 1,7 с відповідно. Як бачимо, застосування скороченого простору ознак знижує обчислювальні витрати у 17 разів. При цьому усі три класифікатори забезпечують безпомилкову класифікацію для навчальної вибірки бази еталонів.

Експериментальне вивчення завадостійкості розроблених підходів з використанням метрики Хаусдорфа (7) при дії адитивного шуму (11) показало, що показник (10) $pr(\mu)$ для традиційного методу і для методу з повним набором 256-ти ФУ дорівнює 1 при $\mu < 8$ і знижується до 0,8 при $\mu = 6$. Для методу із стисненим поданням 16 ФУ $pr(\mu)$ знижується до 0,9 при $\mu = 25$.

Застосуємо тепер метрику Танімото для множин у класифікаторі для трансформованого простору даних з використанням порогу (9) ρ_{lim} як 25% від максимального значення метрики для дескрипторів на усій множині еталонних даних. При цьому максимальне значення метрики, а значить і поріг ρ_{lim} , залежать від впровадженого простору даних.

Відмітимо, що відстань Танімото між еталоном і зашумленим еталоном поступово зростає зі збільшенням рівня шуму (зменшенням μ), а це впливає на точність класифікації.

Експериментальне вивчення завадостійкості розроблених модифікацій класифікатора з використанням метрики Танімото (8) і вибраного порогу ρ_{lim} під впливом адитивного шуму показало, що показник (10) $pr(\mu)$ для методу з повним набором 256-ти ФУ, а також для методу із стисненим поданням 16 ФУ дорівнює 1 (класифікація без помилок) при $\mu \geq 1,2$ і знижується до 0,9 при $\mu = 1$. Для традиційного методу без застосування апарату ФУ показник завадостійкості $pr(\mu)$ знаходиться практично в тих же межах.

Для методу із стисненим поданням у 8 ФУ, з номерами 2,...,9 із табл. 1 значення $pr(\mu)$ знижується до 0,9 при $\mu = 1,2$.

Загалом це досить високі показники завадостійкості для прикладних систем [26], так як метод працює безпомилково навіть при відношенні сигнал-шум близьким до 1!

Час обчислення метрики у модифікованих просторах даних (час класифікації) при цьому скорочується пропорційно кількості використаних функцій Уолша.

Експеримент показав зниження часових витрат у порівнянні з повним набором 256-ти ФУ для 16-ти ФУ у 17 разів, для 8-ми ФУ – у 29 разів (табл. 2).

При цьому час класифікації для традиційного методу шляхом обчислення метрики Танімото для описів без трансформації отримано у 11 разів вищий, ніж для модифікації із 16 ФУ.

Таблиця 2 – Експериментальна оцінка часу класифікації, с

Метод	Час
256 ФУ	222,9
16 ФУ	12,6
8 ФУ	7,8
Традиційний	138,9

Висновки

Застосування системи ортогональних функцій для трансформації опису зображень як множини дескрипторів КТ показало можливість суттєвого вирашу у швидкодії оброблення із збереженням високих показників точності та завадостійкості класифікації. Ключовими моментами ефективності такого подання є вибір метрики для зіставлення трансформованих описів та порогу для встановлення еквівалентності компонентів у новоствореному просторі даних. Більш ефективним виявилось використання метрики Танімото та порогу як 25% від максимального значення вибраної метрики для еталонного набору даних. Процедура визначення складу скороченого кортежу ФУ теж впливає на точність класифікації. Як показало дослідження, впровадженням апарату функцій Уолша вдалося не тільки у десятки разів скоротити обчислювальні витрати, але у той же час забезпечити високі показники результативності класифікації.

Наукову новизну дослідження складає удосконалення методу класифікації зображень на основі впровадження ортогонального розкладання даних та моделей стиснення описів у новоствореному просторі, що значно знижує обчислювальні витрати на класифікацію.

Практична значущість роботи полягає у побудові моделей класифікації у трансформованому просторі даних, підтвердженні працездатності та завадостійкості запропонованих модифікацій на прикладах зображень, створенні програмних застосунків для впровадження розроблених класифікаторів у системах комп'ютерного зору.

Перспективи дослідження можуть бути пов'язані із опрацюванням різноманіття моделей для формування стиснених описів.

REFERENCES

- Ahmed, N. and Rao, K.R. (1975), *Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing*, Springer Verlag Berlin, 248 p.
- Scherer, R. (2020), "Computer Vision Methods for Fast Image Classification and Retrieval", *Studies in Computation Intelligence 821*, Springer Nature Switzerland AG 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12195-2>.
- Pratt W. K. (2001), *Digital Image Processing*, New York: John Wiley and Sons Inc., 723 p.
- Vlasenko, N.V. and Sytnik, O.V. (2013), "Classification of video-objects in attribute space of the Walsh functions", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 72(19), pp. 1777-1785.
- Flach, P. (2012), *Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*, Cambridge University Press: New York, NY, USA, 409 p.
- Alessio, S.M. (2016), *Digital Signal Processing and Spectral Analysis for Scientists*, Springer, 200 p.
- Gorokhovatskiy, V.A. (2011), "Compression of Descriptions in the Structural Image Recognition", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 70, No 15, pp. 1363-1371.
- Gorokhovatsky, A.V., Gorokhovatsky, V.A., Vlasenko, A.N. and Vlasenko, N.V. (2014), "Quality Criteria for Multidimensional Object Recognition Based Upon Distance Matrices", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 73, No 18, pp. 1661-1670.
- Gorokhovatsky, V.O. and Gadetska, S.V. (2019), "Determination of Relevance of Visual Object Images by Application of Statistical Analysis of Regarding Fragment Representation of their Descriptions", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 78 (3), pp. 211-220.
- Gorokhovatskiy, V., Gadetska, S. and Ponomarenko, R. (2020), "Recognition of Visual Objects Based on Statistical Distributions for Blocks of Structural Description of Image", *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making*, Pro-

- ceedings of the XV International Scientific Conference “Intellectual Systems of Decision Making and Problems of Computational Intelligence” (ISDMCI2019), Ukraine, May 21–25, 2019, pp. 501-512.
11. Shapiro, L. (2001), *Computer vision*, Prentice Hall, 625 p.
 12. Svyrydov, A., Kuchuk, H. and Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiently 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: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
 13. Gorokhovatskyi, V. and Vlasenko, N. (2021), “the image description reduction in the set of descriptors on informativeness metric criteria base”, *Advanced Information Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 10-16, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.02.14>.
 14. Kolmogorov, A.N. and Fomin, S.V. (1976), *Elements of the theory of functions and functional analysis*, Nauka, Moscow, 544 p.
 15. Gorokhovatskyi, V.O. and Tvoroshenko, I.S. (2022), “Analysis of multidimensional data by description in the form of a set of components”, monograph, Khnure, Kharkiv, 124 p., doi: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-379-8>.
 16. Gorokhovatskyi, V.A. (2003), *Recognition of images in the conditions of incomplete information*, KHNURE, Kharkiv, 112 p.
 17. (2022), *ORB feature detector and binary descriptor*, available at: https://scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/features_detection/plot_orb.
 18. Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., and Bradski, G. (2011), “ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF”, *Proceedings IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2564-2571.
 19. Manning, C.D., Raghavan, P. and Schütze, H. (2008), *Introduction to Information Retrieval*, University Press, Cambridge, 528 p.
 20. Gorokhovatskyi, V.A. and Putyatin, Y. P. (2009), “Image Likelihood Measures of the Basis of the Set of Conformities”, *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 68 (9), pp. 763–778.
 21. Zalmanson, L.A. (1989), *Fourier, Walsh, Haar transforms and their application in control, communications and other areas*, Nauka, Moscow, 496 p.
 22. Eresko, Y.N. (2002), *Localization of images in automatic viewfinders*, Sputnik+ Company, Moscow, 357 p.
 23. Yakovleva, O., and Nikolaieva, K. (2020), “Research of descriptor-based image normalization and comparative analysis of SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE descriptors”, *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No.4, pp. 89-101, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.13>.
 24. Nong, Ye. (2013), *Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples*, CRC Press, Florida, USA, 349 p.
 25. Daradkeh, Y.I., Gorokhovatskyi, V., Tvoroshenko, I., Gadetska, S., and Al-Dhaifallah, M. (2021), “Methods of Classification of Images in the Basis of the Values of Statistical Distributions for the Composition of Structural Description Components”, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 929.64-929.73, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093457>.
 26. Daradkeh, Y.I., Gorokhovatskyi, V., Tvoroshenko, I. and Al-Dhaifallah, M. (2022), “Classification of Images Based on a System of Hierarchical Features”, *Computers, Materials & Continua*, Vol. 72(1), pp. 1785-1797, doi: <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.025499>.
 27. Gorokhovatskyi, V.O., Gadetska, S.V. and Stiahlyk, N.I. (2019), “Exploring the Statistical Properties of a Block Representation Model for a Set of Image Keypoint Descriptors”, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, No. 2, pp. 100-107.
 28. Gadetska, S., Gorokhovatskyi, V., Stiahlyk, N. and Vlasenko, N. (2022), “Aggregate Parametric Representation of Image Structural Description in Statistical Classification Methods”, *CEUR Workshop Proceedings: Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2022)*, 3137, pp. 68-77, doi: <https://doi.org/10.32782/cmisis/3137-6>.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ahmed N., Rao K.R. *Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing*, Berlin : Springer Verlag, 1975. 248 p.
2. Scherer, R. *Computer Vision Methods for Fast Image Classification and Retrieval. Studies in Computation Intelligence 821*, Springer Nature Switzerland AG 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12195-2>.
3. Pratt W. K. *Digital Image Processing*. New York: John Wiley and Sons Inc., 2001, 723 p.
4. Vlasenko N.V., Sytnik, O.V. Classification of video-objects in attribute space of the Walsh functions. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013. Vol. 72(19). P. 1777–1785.
5. Flach, P. *Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*. New York: Cambridge University Press, 2012. 409 p.
6. Alessio, S.M. *Digital Signal Processing and Spectral Analysis for Scientists*, Springer, 2016, 200 p.
7. Gorokhovatskyi, V.A. Compression of Descriptions in the Structural Image Recognition. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2011, Vol. 70, No 15. P. 1363–1371.
8. Gorokhovatskyi V.A., Gorokhovatsky V.A., Vlasenko A.N., Vlasenko N.V. Quality Criteria for Multidimensional Object Recognition Based Upon Distance Matrices. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014. Vol. 73, No 18. P. 1661-1670.
9. Gorokhovatsky V.O., Gadetska S.V. Determination of Relevance of Visual Object Images by Application of Statistical Analysis of Regarding Fragment Representation of their Descriptions. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78 (3). P. 211-220.
10. Gorokhovatskyi V., Gadetska S., Ponomarenko R. Recognition of Visual Objects Based in Statistical Distributions for Blocks of Structural Description of Image. *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making*. Proceedings of the XV International Scientific Conference “Intellectual Systems of Decision Making and Problems of Computational Intelligence” (ISDMCI2019), Ukraine, May 21–25. 2019. P. 501-512.
11. Shapiro L. *Computer vision*. Prentice Hall, 2001. 625 p.
12. Svyrydov A., Kuchuk H., Tsiapa O. Improving efficiently of image recognition process: Approach and case study. *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*. 2018. P. 593-597. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
13. Гороховатський В.О., Власенко Н.В. Редукція опису зображення у складі множини дескрипторів на основі метричного критерію інформативності. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, №4. С. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.02>.

14. Колмогоров А.Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. Москва.: Наука, 1976. 544 с.
15. Гороховатський В.О., Творошенко І.С. Аналіз багатовимірних даних за описом у форм і множини компонент: монографія. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 124 с. DOI: 10.30837/978-966-659-379-8.
16. Гороховатський В.А. Распознавание изображений в условиях неполной информации. Харків, ХНУРЕ, 2003. 112 с.
17. ORB feature detector and binary descriptor. 2022. URL[^]
https://scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/features_detection/plot_orb.
18. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. *Proceedings IEEE International Conference in Computer Vision (ICCV)*, 2011. P. 2564-2571.
19. Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge: University Press, 2008. 528 p.
20. Gorokhovatsky V.A., Putyatin Y. P. Image Likelihood Measures of the Basis of the Set of Conformities. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2009. Vol. 68 (9). P. 763-778.
21. Залманзон Л. А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. Москва: Наука, 1989. 496 с.
22. Ересько Ю.Н. Локализация изображений в автоматических визирах. Москва: Компания Спутник+, 2002. 357 с.
23. Yakovleva O., Nikolaieva K. Research of descriptor-based image normalization and comparative analysis of SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE descriptors. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, No. 4, pp. 89-101. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.13>.
24. Nong Ye. Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples. Florida, USA: CRC Press, 2013. 349 p.
25. Daradkeh Y.I., Gorokhovatsky V., Tvoroshenko I., Gadetska S., Al-Dhaifallah M. Methods of Classification of Images in the Basis of the Values of Statistical Distributions for the Composition of Structural Description Components. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 929.64-929.73. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093457>.
26. Daradkeh Y.I., Gorokhovatsky V., Tvoroshenko I., Al-Dhaifallah M. Classification of Images Based on a System of Hierarchical Features. *Computers, Materials & Continua*. 2022. 72(1). P. 1785-1797. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.025499>.
27. Гороховатський В.О., Гадецька С.В., Стяглик Н.І. Вивчення статистичних властивостей моделі блочного подання для множини дескрипторів ключових точок зображень. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, 2019. № 2. С. 100-107.
28. Gadetska S., Gorokhovatsky V., Stiahlyk N., Vlasenko N. Aggregate Parametric Representation of Image Structural Description in Statistical Classification Methods. *CEUR Workshop Proceedings: Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2022)*, 3137. 2022. P. 68-77. DOI: <https://doi.org/10.32782/cmisis/3137-6>.

Received (Надійшла) 26.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Гороховатський Володимир Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Volodymyr Gorokhovatskyi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Informatics Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: gorohovatsky.vl@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7839-6223>.

Творошенко Ірина Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Iryna Tvoroshenko – Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of Informatics Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: iryna.tvoroshenko@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7184-8143>.

Чмутов Юрій Вадимович – студент кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Yurii Chmutov – student of Informatics Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: yurii.chmutov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6164-6126>.

Application of systems of orthogonal functions for formation of sign space in image classification methods

Volodymyr Gorokhovatskyi, Iryna Tvoroshenko, Yurii Chmutov

Abstract. The subject of the article's research is the improvement of structural methods of image classification in computer vision systems. The goal is to reduce computational costs for classification by implementing a device for decomposing image description components using a system of orthogonal functions and implementing feature space compression models. Applied methods: ORB key point detector, set theory apparatus and vector spaces, metric models for determining relevance to sets of multidimensional vectors, theory of orthogonal decomposition of vectors, elements of probability theory, software modeling. Obtained results: modifications of the image classification method based on the introduction of orthogonal data decomposition in vector space were developed, models were proposed for data compression in the transformed feature space, Tanimoto metric was introduced for image comparison, a threshold selection method was established for determining equivalent description components. The effectiveness of the developed modifications of the classifier depends on the selection of a subset of functions for decomposition, the metric for comparing descriptions, and the method of determining the equivalence threshold. The implementation of the apparatus of orthogonal functions not only reduced computational costs tenfold, but also ensured sufficiently high indicators of classification performance and interference resistance. The practical significance of the work is the construction of new models of the image classifier in the transformed space of features, confirmation of the functionality, speed and immunity of the proposed modifications on examples of images, the creation of a software application for the implementation of the developed classification methods in computer vision systems.

Keywords: computer vision; structural methods of image classification; ORB descriptor; orthogonal decomposition; Walsh functions; processing speed; effectiveness of classification.

ВЕКТОРНИЙ МЕТОД ПОШУКУ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ У ВЕЛИКИХ ДАНИХ

Анотація. Пропонується технологічне програмне рішення для метричного пошуку та ідентифікації логіко-часових патернів бізнес-потоків даних за рахунок створення додаткових векторних структур даних та паралельного методу їх обробки. **Предметом досліджень** є методи пошуку та ідентифікації логіко-часових патернів у великих даних. **Метою** є підвищення ефективності пошуку та розпізнавання логіко-часових патернів, що семантично утворюють бізнес-функціональності у 8-годинному часовому фреймі скріншотів зі «сміттевіми» даними. **Застосовані методи:** апарат теорії множин та булевої алгебри, метричні матричні моделі визначення параметрів для множин двійкових векторів, елементи теорії ймовірностей, теорія алгоритмів, програмне моделювання, аналіз великих даних. **Отримані результати:** метод пошуку та розпізнавання патернів на основі векторного завдання символічних послідовностей, які ідентифікують патерни у потоках великих даних, що використовує унітарне кодування інформаційних примітивів та даних; векторні моделі – структури унітарно-кодованих даних для опису потоку великих даних, як декартові добутки множин примітивів-string-маркерів та дискретної послідовності-реалізації заданого часового фрейма. **Практична значущість** роботи полягає у реалізації векторного методу, що дозволило створити програму розпізнавання патернів у потоці великих даних з ймовірністю 0,77%.

Ключові слова: логіко-часові патерни; бізнес-функціональності; часовий фрейм; пошук та ідентифікація; метрика перетину-об'єднання; верифікація коду.

1. Постановка проблеми

Детермінований цифровий комп'ютер (DC) завжди краще за будь-яку ймовірнісну технологію, будь то: машинне навчання, нечітка логіка, штучний інтелект, нейромережі, еволюційні алгоритми. Всі AI-технології мають на меті досягти у своїй досконалості або навчанні детермінізму класичного комп'ютерингу. Метрикою для досягнення такої досконалості є критичні параметри: Yield – якість обчислювача або розпізнавання та Time-to-Market – час для досягнення такої якості. Інтерес представляє співвідношення між AI і класичним комп'ютерингом у метриці точності (якості) розв'язання задачі та часу Yield – Time-to-Market створення придатного для використання на практиці обчислювача, рис. 1.

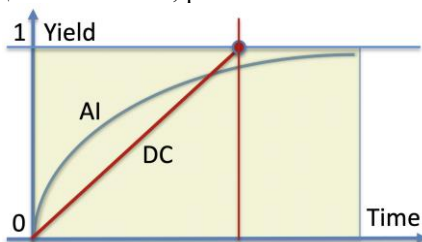


Рис. 1. Метричне відношення між AI- та детермінованим комп'ютером (Fig. 1. Metric relation between AI- and deterministic computer)

Таким чином, DC характеризується як інтелектуальна творчість (human intelligence), коли потрібно інтелектуальне напруження, щоб отримати точний розв'язок, а AI – є рутинне навчання (routine training), що призведе до ймовірнісного неточного розв'язку за тривалий час. Іншими словами, штучний інтелект не вимагає природного інтелекту, а детермінований комп'ютеринг обов'язково використовує високий рівень природного інтелекту. Виходить, що дедуктивні методи, які мають апріорну точність логічних виразів або аналітичних формул, є кращими для їх імплементації в практику, ніж індуктивні методи, що

вимагають тривалого навчання та верифікації для впровадження у виробничі процеси. Але залишається велике поле невизначених (неповних, нечітких) знань про процес чи явище, де тимчасовим виходом может служити ймовірнісний AI-розв'язок задачі.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Метрично визначити належність задачі до потенційного детермінізму чи ймовірнісного підходу її вирішення – було, є і буде моментом істини у творчості на полі emerging computing. Деяким підтвердженням сказаного є трендова картина топ-технологій від компанії Gartner [1], представлена на рис. 2.

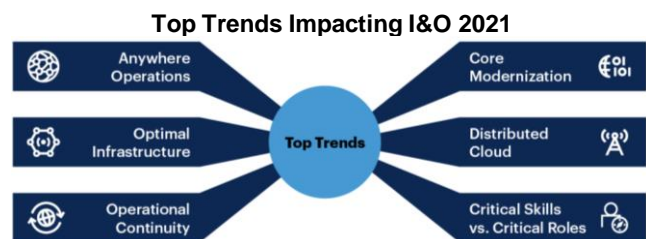


Рис. 2. Напрямки впливу моделей інфраструктури та операцій на бізнес (Fig. 2. Directions of influence of infrastructure and operations models on business)

Тут наголошується на операційну локальність виконання бізнес-функціональностей в оптимальній кібер-фізичній інфраструктурі співробітниками, що мають не ролі (позиції), а критичні знання про нові технології, включаючи хмарні федеральні послуги машинного навчання (Federative Machine Learning) [2,3]. Візуалізація структурованих даних, що ієрархічно еволюціонують, із часом перетворюється у проблему. Існує кілька підходів до її вирішення [4]. Такі методи, як анімовані або зіставлені деревоподібні візуалізації, не здатні забезпечити хороший огляд часових рядів і не мають виразності в передачі змін у часі. Вкладені потокові графи забезпечують краще розуміння еволюції даних, але не мають чіткої схеми

ієрархічних структур на заданому часовому кроці. Ці підходи часто обмежуються статичними ієрархіями або виключають складні ієрархічні зміни даних, обмежуючи варіанти їх використання. Пропонований метод дозволяє плавно переходити між деревоподібними картами та вкладеними графами потоків, дозволяючи досліджувати компроміс між динамічною поведінкою та ієрархічною структурою. Оскільки технологія обробляє топологічні зміни всіх типів, вона підходить для широкого загалу додатків. Демонструється корисність методу на декількох прикладах, оцінюючи його за допомогою дослідження користувача, з наданням повного вихідного коду.

У дослідженні [5] розпізнавання образів контрольних карток (CCPR) у більшості попередніх методів використовувався класифікатор для позначення аномальних ККТ. Однак довгострокові дані контрольної картки часто містять велику кількість невеликих аномальних патернів з характеристиками, відмінними від тих, що видно при глобальному перегляді всієї картки. Існує також висока ймовірність того, що локальні аномальні патерни заслуговують на аналіз. Представлено нову схему розпізнавання образів багатомасштабних контрольних діаграм, MS-CCPR, яка не фокусується на класифікації даних з однієї діаграми. Натомість схема використовує пропоноване представлення даних на основі гістограм у поєднанні зі зіставленням під послідовностями часових рядів для виявлення аномальних закономірностей у різних масштабах з довгого ряду контрольних карт. Експериментальні результати демонструють ефективність запропонованої структури ефективного виявленні графічних патернів у різних масштабах, перевершуючи сучасні алгоритми зіставлення послідовностей часових рядів.

У роботі [6] розглянуто проблему розпізнавання образів перешкод (JPR), коли деякі образи не мають навчальних вибірок. Існуючі роботи у цьому напрямі описують розпізнавання лише відомих моделей перешкод і розглядають ситуації із невідомими перешкодами. Автори пропонують схему JPR на основі навчання з нульовим пострілом (ZSL). На першому кроці вводиться контрольований процес навчання для вивчення уявлення прихованих ознак відомих шаблонів перешкод. Потім пропонується неконтрольований підхід до класифікації для розпізнавання різних моделей перешкод. Нарешті, як відомі, і невідомі шаблони перешкод класифікуються у просторі прихованих ознак. Результати моделювання показують, що запропонована схема забезпечує відмінну продуктивність під час роботи з відкритими задачами JPR.

В останні роки розпізнавання [7] виразу обличчя (FER) привернув велику увагу через його широке застосування. Хоча певного прогресу було досягнуто завдяки появі глибокого навчання, проблема, пов'язана зі зміною поз, залишається. Більшість традиційних підходів здебільшого виконують FER у лабораторно-контрольованому середовищі, а FER у дикій природі приділяється щодо меншої уваги. Для реалізації FER у дикій природі можливим рішенням була б модель розпізнавання виразів, інваріантна до

пози, але для неї існує проблема нестачі навчальних даних. Достатні навчальні дані з надійними мітками виразів для FER зазвичай недоступні. Ця стаття присвячена вирішенню проблеми моделювання варіації пози на зображеннях обличчя та використання зашумлених даних в Інтернеті для підвищення продуктивності FER. Пропонована модель реалізується наскрізним способом зі слабким контролем і має низку переваг. По-перше, вона використовує масивні зашумлені розмічені дані підвищення продуктивності класифікатора FER, навченого на невеликому наборі чистих міток. По-друге, пропонується нова мережа моделювання поз для адаптивного фіксування невідповідностей у просторі глибоких уявлень зображень обличчя за різних поз голови. Запропонована модель дозволяє вивчити уявлення інваріантних до пози виразів. Для використання надійної інформації в зашумлених даних сформульована мережа моделювання шуму, яка здатна вивчати відображення простору ознак залишки між чистими мітками і зашумленими мітками. Запропонований підхід перевірено на 4-х загальнодоступних тестах FER: AffectNet, RAF-DB, SFEW та BU-3DFE. Великі експерименти показують, що запропонований метод кращий за інші сучасні методи. Іноді розпізнавач смітєвих даних ефективніше працює, ніж розпізнавач функціонального ряду.

Прогноз фінансових часових рядів [8] є основним об'єктом вивчення у галузі фінансової економетрики. На першому етапі виконується відділення будь-яких систематичних варіацій цих рядів від їх випадкових рухів. Систематичні зміни можуть бути викликані трендами, сезонними та циклічними коливаннями. Економетричні моделі включають різні рівні складності для імітації різноманітних закономірностей. Проте алгоритми машинного навчання можна використовувати прогнозування нелінійних часових рядів, оскільки можуть навчатися і розвиватися разом із фінансовими ринками. Найбільш стандартним економетричним підходом до прогнозування тенденцій фінансових часових лав є методологія Бокса та Дженкінса (1970). Розглянутий підхід заснований на визначенні відповідних систематичних варіацій часового ряду (тренд, сезонні або циклічні ефекти).

3. Постановка завдання

Мета дослідження – підвищення ефективності пошуку та розпізнавання логіко-часових патернів, що семантично утворюють бізнес-функціональності у 8-годинному часовому фреймі скріншотів зі смітєвими даними.

Початкові дані: файли бізнес-потоків у 8-годинному часовому кадрі, що містять патерни формування бізнес-функціональностей, а також інтервали часу для формування бізнес-функціональностей. Значимість даних визначається часовим інтервалом, а також вручну призначеними компонентами, які можуть мати незначний час виконання.

Задачі:

1) формування моделі – структур даних для опису потоку невизначених множин патернів, сукупність фрагментів, які мають ідентифікатори початку

та кінця. Багато патернів має в кінці кожного фрагмента цифровий ідентифікатор;

2) розробка унітарно кодованої матричної моделі як декартового добутку множини примітивів-символів та set-вектора дискретної послідовності-реалізації заданого часового бізнес фрейму;

3) синтез логіки алгоритмів для пошуку, ідентифікації та класифікації патернів-множин. Визначення прийняттого формату вихідних даних та супроводної статистики;

4) верифікація знайденої сукупності патернів на основі метрики перетину-об'єднання;

5) тестування та верифікація програми, оформлення коду алгоритму та опису структур даних.

4. Основний матеріал дослідження

4.1. Розробка моделі для пошуку та ідентифікації бізнес-патернів. Модель для синтезу логіки алгоритму пошуку та ідентифікації є вихідною або первісною матрицею, форматованою в метриці параметрів <string-primitives – business-flow>, що представлено на рис. 3.

Strings	Patterns											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1				1							
B		1		1								
C			1					1				
D							1					
E				1								
F					1							
G						1						
H								1				
K									1		1	
L										1		1

Рис. 3. Матриця у метриці параметрів (Fig. 3. The matrix in the parameter metric) <string-primitives – business-flow>

Тут кожен стовпець має лише одну одиницю, оскільки скріншот не може (не повинен) містити два активні вікна різних функціональностей. Рядки містять кінцеву кількість одиниць, які формують участь примітиву в одному або декількох патернах в рамках заданого часового фрейму (8 годин). Як правило, послідовність сусідніх стовпців-векторів, що мають одиниці, складають патерн своїми літерними (стринговими) ідентифікаторами. Тривалість одного патерну регулюється часовим інтервалом, який має певну статистику обробки даних. Саме часовий інтервал виконання бізнес-функціональності є верифікатором-розділювачем одного патерну від іншого, якщо в них використовуються однакові множини string-ідентифікаторів, що беруть участь у формуванні бізнес-функціональностей.

Прикладом-результатом виконання цієї процедури є табл. 1. Тут об'єднання підмножин-примітивів виділені різними кольорами, де перетини утворених підмножин по групах рядків і стовпців (знайдені еквівалентні групи, що становлять патерни, табл. 2) дорівнюють порожній множині, а їх об'єднання становить бізнес-потік:

Знайти кореляцію між примітивами, що становлять патерн, шляхом застосування алгоритмів класифікації є сутністю завдання. Для підвищен-

ня продуктивності навчання можна використовувати розподілену структуру, представлену на рис. 4.

Таблиця 1 – Приклад виконання процедури

Strings	Patterns											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1											
B		1										
C			1									
D						1						
E					1							
F				1								
G						1						
H							1					
K								1				
L									1			1
M										1		
N											1	

Таблиця 2 – Виділення патернів

Strings	Patterns											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1											
B		1										
C			1									
D						1						
E					1							
F				1								
G						1						
H							1					
K								1				
L									1			1
M										1		
N											1	

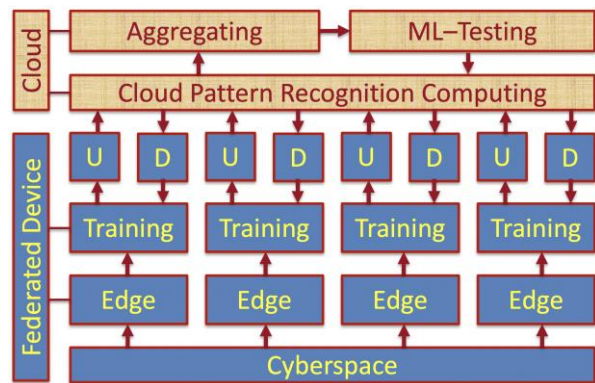


Рис. 4. Масове машинне навчання FML (Fig. 4. FML massive machine learning)

Далі необхідно формувати квадратичну матрицю частотної взаємодії букв-примітивів (граф частотностей переходів на буквах) з метою визначення кореляції між ними та виділення підмножини букв, відповідних патернам. Тут вирішується задача еквівалентування підмножин, які повинні перетинатися, але становити повну множину літер (патернів) за її об'єднанні. Окремий випадок взаємодії патернів на діаграмах та в картах Карно (О. Дрозд) показаний на рис. 5.

Розглядається послідовність фрагментів-примітивів

$$G_i = ID_i (F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_n)$$

з одним цифровим ID-ключом, де кожен фрагмент символів-літер – рядок має виражені початок і кінець:

$$F_i = (start, a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_m, end-ID_i)$$

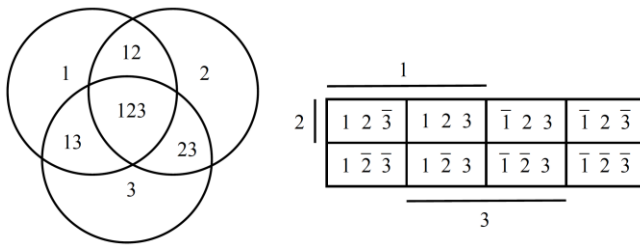


Рис. 5. Взаємодія патернів ID-послідовності, що підлягає поділу (Fig. 5. Interaction of ID-sequence patterns to be separated)

Сукупність із n послідовностей дій створює бізнес-потік, 8 годин:

$$G = (G_1, G_2, \dots, G_i, \dots, G_n).$$

Знайти функціонально подібні послідовності та об'єднати їх в один клас означає побудувати set-модель бізнес-процесу, яка наочніше і простіше при аналізі. Сформувати k різних класів функціональностей на потоці G . Виконати верифікацію k знайдених класів еквівалентних послідовностей дій.

Слід пам'ятати, що еквівалентні послідовності можуть відрізнятися друг від друга за подібністю 90 відсотків і менше.

Еквівалентування – процес пошуку та ідентифікації сукупності (підмножини) послідовностей дій (послідовностей функціональних фрагментів) бізнес-процесу, що мають метрично однакові властивості (рефлексивність, симетричність і транзитивність). Set-вектор – позначення сукупності (множини) компонентів у формі впорядкованої послідовності символів чи чисел. Будь-яка множина (підмножина) еквівалентно по відношенню до належності своїх елементів. Дві підмножини еквівалентні, якщо вони мають однакові елементи. У матричній формі підмножина представлена квадратом елементів діагоналі. Нова метрика: відношення між кінцевим числом об'єктів є еквівалентним, якщо циклічна сума відстаней між ними дорівнює нулю:

$$\bigoplus_{i=1, n} d_i = 0.$$

Сильна зв'язність графа є сукупність вершин з відсутністю зв'язків, крім відношення власності. Матриця множини є двовимірною структурою, координати якої усюди визначені одиницями

4.2. Алгоритм синтезу моделі:

1. Вихідні дані: текст-вектори, що мають початок-і кінець-ідентифікатори, що перетворюються на числа-літери set-вектора:

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n).$$

2. Формування рядків для бінарної матриці set-векторів на метриці унікальних чисел за правилом: $M_{ij}(S_j) = 1$. В результаті буде сформовано m рядків матриці, що дорівнює кількості послідовностей дій або set-векторів. Число стовпців дорівнює кількості унікальних квадратиків-літер-цифр у вектор-універсумі U : if Symbol $\notin U$ then $p = p + 1$. Останнім буде p -індекс, що дорівнює потужності унікальних квадратиків у всіх послідовностях дій (табл. 3).

Таблиця 3 – Формування рядків

G=	A	B	C	D	E	F	K	L	N	M	P	T
U=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S1=ABC	1	1	1									
S2=ABC	1	1	1									
S3=DEF				1	1	1						
S4=KLN							1	1	1			
S5=ABC												
S6=MPT	1	1	1									
S7=KLN										1	1	1
S8=DEF							1	1	1			

Перевпорядкування рядків-послідовностей двійкової матриці призводить завжди до діагональної структури однорідних функціональностей, яка показує обсяг кожного виду діяльності оператора в рамках 8-годинного часового фрейму (табл. 4).

Таблиця 4 – Перевпорядкування рядків

G=	A	B	C	D	E	F	K	L	N	M	P	T
U=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S1	1	1	1									
S2	1	1	1									
S5	1	1	1									
S3				1	1	1						
S8				1	1	1						
S4							1	1	1			
S7							1	1	1			
S6										1	1	1

При цьому чітко видно, що перетин діагональних підматриць, що створюють еквівалентні послідовності дій, дорівнює порожній множині, а їх об'єднання – сукупному бізнес-процесу.

3. Виконується квадратичне паралельне хог-порівняння всіх рядків матриці між собою для формування оцінок подібності, зведених у відповідну квадратичну матрицю

$$S(S_i, S_j) = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \wedge S_j)}{\sum_{i=1}^n (S_i \vee S_j)},$$

розмірність якої дорівнює потужності послідовностей дій у бізнес-потокі (табл. 5).

Таблиця 5 – Результат хог-порівняння

Sim	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S1	1	1,0			1,0			
S2	1,0	1						
S3			1					1,0
S4				1			1,0	
S5	1,0				1			
S6						1		
S7				1,0			1	
S8			1,0					1

4. Еквівалентування послідовностей дій (set-векторів) за класами, що визначаються максимальними оцінками їхньої подібності. Береться перший рядок, в якому вибираються всі координати рівні 1 (або деякому максимальному значенню), які ідентифікують еквівалентний клас послідовностей-стовпців. Потім усі стовпці та рядки, що відповідають еквівалентним послідовностям дій (S_1, S_2, S_5), обнуляються. Можна також викреслювати їх, зменшуючи розмірність матриці на кожному кроці, що показано на табл. 6, 7.

Таблиця 6 – Еквівалентування set-векторів за класами (початок процесу)

Sim	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S1	1	1,0			1,0			
S2	1,0	1						
S3			1					1,0
S4				1			1,0	
S5	1,0				1			
S6						1		
S7				1,0			1	
S8			1,0					1

Таблиця 7 – Еквівалентування set-векторів за класами (підсумок)

Sim	S3	S4	S6	S7	S8
S3	1				1,0
S4		1		1,0	
S6			1		
S7		1,0		1	
S8	1,0				1

Код для пошуку еквівалентних класів послідовностей дій має такий вигляд:

$M_{ij}; i, j ++; \text{if } M_{ij} = 1,0 \text{ then } k ++; Ek = j;$
 $M_i - \text{delete}; M_j - \text{delete}.$

5. Далі розглядається черговий рядок (після видалення рядків і стовпців завжди розглядається перший рядок і перша координата в ньому), де є значуща координата, що дорівнює 1. Алгоритм триває до повного обнулення (викреслення) всіх координат, яке свідчить про побудову всіх класів еквівалентних послідовностей дій (табл. 8).

Таблиця 8 – Результат алгоритму

Sim	S4	S6	S7	Sim	S6
S4	1		1,0	S6	1
S6		1			
S7	1,0		1		

6. Отже, найпростіший алгоритм викреслення рядків та стовпців за суттєвими координатами дає можливість розбити матрицю на класи еквівалентностей:

$$E = \{\{S_1, S_2, S_5\}, \{S_3, S_8\}, \{S_4, S_7\}, \{S_6\}\}.$$

Еквівалентування можна проводити і по першій двійковій матриці послідовностей дій, але лише в тому випадку, коли критерієм еквівалентності буде повний збіг пари послідовностей дій по всіх координатах. В іншому випадку необхідно задавати нижню межу подібності (наприклад, >0,8), відносно якої слід вважати послідовності дій, що належать до одного класу еквівалентності.

7. Верифікація отриманого результату шляхом виконання процедур перетину пар еквівалентних класів, яке має бути порожньою множиною. Об'єднання класів має дорівнювати бізнес-поток.

4.3. Перетворення структури ГСА на множини елементів-функцій.

Задача. Перетворити структуру ГСА на множини елементів-функцій, що підлягають виконанню, інваріантним до порядку. Це означає – покрити сукупність елементів активності оператора та визначити схожість – відмінність кожної послідовності дій, що належить до класифікованого виду функціональності. Інакше, визначити загальне ядро та диференціатори для кожної послідовності дій у вигляді підмножини літер універсуму. Таких класів може бути кінцева множина. Заміна структури множиною означає усунення істотних деталей моделі процесу чи явища. Однак для вирішення великої кількості завдань комп'ютерингу структурні особливості створюють обчислювальну складність алгоритму без явних і видимих переваг у кінцевому результаті. Іншими словами, якщо є можливість розв'язати задачу примітивної безадресної (безструктурної) логіки квантового обчислювача (теорії множин), то алгоритми перетворюються на кілька рядків коду, суть яких – поєднання непустих результатів перетину вхідного набору з рядками регулярної (унітарної) таблиці істинності, що в алгебрі логіки диз'юнкція несуперечливих кон'юнкцій. Це є шлях до спрощення структурно складних алгоритмів, що мають багато умов та паралельних шляхів для отримання результату.

Підстава для виконання завдання: теоретико-множинне подання як заведено складної структурної моделі бізнес-процесу, яка є не тільки компактною, але і більш зрозумілою і доступною для користувача, рис. 6.

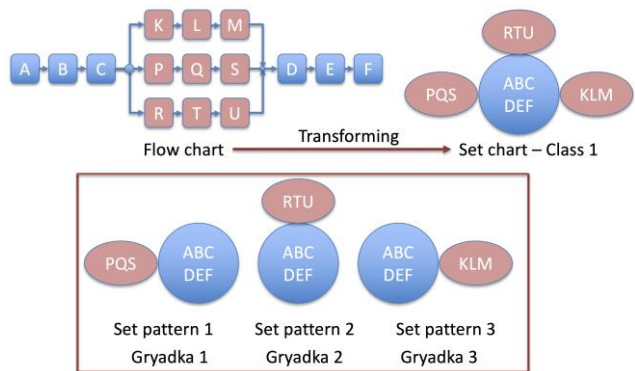


Рис. 6. Трансформування структури у множини (Fig. 6. Transforming the structure into a set)

Звичайно, форма зображення класів послідовностей дій має значення для користувача з погляду

візуалізації та зручності сприйняття інформації про зміст бізнес-процесу. Один з можливих варіантів зображення двох класів патернів-последовностей наведений на рис. 7

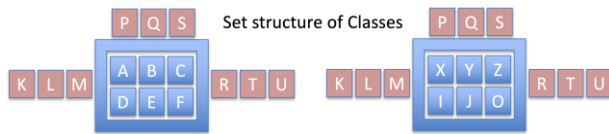


Рис. 7. Set-структури двох класів последовностей дій (Fig. 7. Set structures of two classes of action sequences)

Вихідна інформація представлена у вигляді гілок flow chart, які створюють последовності дій (патерни) як відбитки виконання функціональностей операторами. Set-модель последовності представляється у вигляді підмножини унікальних символів, інваріантних до повторень та порядку прямування. Це дає можливість значно спростити модель бізнес-процесу для подальшого аналізу. Set-последовність є ідеальною формою визначення кінцевого числа класів функціональностей, і навіть для ідентифікації відмінностей між последовностями одного класу. Таким чином, последовність G_i , як примітив-патерн бізнес-процесу має такий формат:

$$G_i = \{S_i, D_i\},$$

де S_i – ядро класу последовностей дій, яке є загальним атрибутом, складеним із букв-примітивів, D_i – диференціатори последовностей, які створюють різницю між последовностями одного класу. Таблиця структури последовностей дій з доповненнями має вигляд виражених подібностей та відмінностей (табл. 9).

Таблиця 9 – Таблиця структури последовностей дій

G=	A	B	C	D	E	F	K	L	N	M	P	T	1	2	3	4	5	6	7	8	
U=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
S1	1	1	1										1								
S2	1	1	1											1							
S5	1	1	1												1						
S3				1	1	1										1					
S8				1	1	1											1				
S4							1	1	1										1		
S7							1	1	1											1	
S6										1	1	1									1

Алгоритм класифікації містить такі пункти:

- 1) вибір чергової последовності дій для її перетину з рештою інших з метою визначення непустих перетину, яке створює ядро класу;
- 2) формування різниці між последовностями одного класу шляхом виконання операції симетричної різниці.
- 3) інкремент номера чергової последовності на множині, що залишилася, з метою повторення пунктів 1 і 2 алгоритму для визначення чергового класу. Алгоритм триває до того часу, поки існують ще последовності, не включені в жодного класу.

Алгоритм по суті містить дві процедури:

- 1) класифікація всіх рядків-последовностей шляхом пошуку максимальної подібності (з нижньою межею $>0,8$) між рядками таблиці істинності;

- 2) визначення відмінностей-диференціаторів між рядками кожного класу шляхом виконання хог-операцій між последовностями дій.

Вхідні дані. Вихідний файл містить рядки, що становлять последовності дій, обмежені маркерами (st, en). Кількість таких последовностей створює робочий день одного оператора, у разі йдеться про двох операторах, де перший представлений двома днями, а другий – одним. Рядки між маркерами en і st ігноруються. Формат даних рядка представлений інтегрально і розділено п'ятьма полями-атрибутами, які у сукупності створюють кортеж, який має бути ідентифікований символом (цифрою) універсуму літер, які необхідно і досить формують заданий бізнес-процес. Структура вектору ідентифікаторів бізнес-процесу має такий вигляд:

$$P = (12342318) (14567331) (1234445635) (123455334667) (12343234555).$$

При цьому універсум примітивів $U=(12345678)$ представлений вектор-множиною унікальних номерів, яким ставляться у відповідність стрінги-цеглинки. Примітиви створюють вектор ідентифікаторів бізнес-процесу.

Алгоритм створення універсуму примітивів-літер містить такі пункти:

- 1) перегляд чергового рядка Activity Name. Якщо вона раніше не зустрічалася, вона заноситься до масиву універсуму примітивів U і їй присвоюється черговий унікальний номер в нумерації універсуму;
- 2) цей номер також присвоюється рядку даних Activity Name, який формує вектор номерів примітивів P , що дорівнює за довжиною числа рядків таблиці бізнес-процесу;
- 3) якщо рядок раніше зустрічався у таблиці бізнес-функціональності, то йому надається відповідний номер з універсуму примітивів U . Процес нумерації рядків U триває до повної ідентифікації їх номерами примітивів.

Після синтезу універсуму примітивів і вектору ідентифікації P рядків бізнес-процесу виконується алгоритм формування двійкової матриці последовностей дій, у метриці універсуму примітивів шляхом використання вектору P : виконується занесення до початкового рядку матриці одиничних значень за тими координатами, які фігурують у векторній формі дій $M(i, j) = P(k)$, що регламентується ідентифікаторами початку та кінця чергової последовності. Число последовностей n формує кількість рядків матриці.

Після синтезу матриці **визначаються класи еквівалентних последовностей дій** шляхом виявлення подібності між усіма парами последовностей. При цьому всередині одного класу формуються диференціатори, що розрізняють кожну последовність усередині класу функціональними особливостями.

Уточнення. Необхідно враховувати час створення символів-рядків у кожному фрагменті чи последовності. Матриця визначена в метриці універсуму примітивів-символів-рядків, декартово помноженої на кількість последовностей, кожна з яких містить кінцеву кількість фрагментів. При цьому координата матриці визначена чисельним значенням часу, який

інтегрально було витрачено на формування символ-рядка у масштабах послідовності. Приклад матриці «універсум-послідовності» наведений у табл. 10.

Таблиця 10 – Приклад матриці «універсум-послідовності»

G=	A	B	C	D	E	F	K	L	N	M	P	T	1	2	3	4	5	6	7	8	
U=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
S1	2	4	7										5								
S2	4	3	2											5							
S5	4	5	5												6						
S3				3	5	4										7					
S8				2	5	7											4				
S4							6	7	7										3		
S7							5	4	3											6	
S6										5	3	7									3

Тут значення кожної координати визначається сумою часів формування літери-рядка у всіх фрагментах однієї послідовності

$$M_{ij} = \sum_{j=1}^n a_j, \quad a_j \in G_i.$$

Метрика для підрахунку подібності між рядками матриці використовує трансформацію формули подібності для двійкової матриці:

$$S(S_i, S_j) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(S_i \wedge_{i=1, n} S_j \right)}{\sum_{i=1}^n \left(S_i \vee_{i=1, n} S_j \right)} \approx \frac{\sum_{i=1}^n \left[\min(S_i, S_j) \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\max(S_i, S_j) \right]}$$

Наприклад, подібність між першим і другим рядками матриці визначається п'яти обчисленнями:

$$S(S_1, S_2) \approx \frac{\sum_{i=1}^n \left[\min(2, 4), (4, 3), (7, 2), (5, 0), (0, 5) \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\max(2, 4), (4, 3), (7, 2), (5, 0), (0, 5) \right]} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\min(2), (3), (2), (0), (0) \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\max(4), (4), (7), (5), (5) \right]} = \frac{7}{25} = 0,28.$$

Якщо символ-рядок, що ідентифікується літерою, більш важлива для формування послідовності дій, навіть за малого значення часу, то їй надається максимальна вага в масштабі всієї матриці бізнес-послідовностей.

4.4. Макро-алгоритм визначення класів еквівалентностей:

1) Визначення універсум-алфавіту для формування стовпців матриці бізнес-процесу. Для цього проглядається весь потік даних з метою виділення лише множини оригінальних символів-рядків.

2) Фаза заповнення чергового (поточного) рядка матриці шляхом перебору символів у фрагментах однієї послідовності дій для адитивного формування часових характеристик кожного символу, що бере участь в інтегральній функціональності послідовності:

$$M_{ij} = M_{ij} + t \cdot (G_k) \leftarrow G_k = a_j,$$

де символ-рядок $a_j \in U$ створює універсум і одночасно належить послідовності $a_j \in G_i$, що формує j -координату в i -рядку матриці.

3) Фаза формування квадратичної матриці подібності шляхом застосування мінімальної метрики для визначення Similarity.

4) Фаза визначення класів еквівалентних послідовностей шляхом пошуку максимальних значень подібності між рядками матриці бізнес-процесу.

5) Фаза перевірки або верифікації отриманих класів еквівалентностей шляхом їх перетину-об'єднання, що має бути порожньою множиною та бізнес-потоків відповідно.

Програмна реалізація дозволила отримати 100 послідовностей та 2000 примітивних символів, де є порожні за часом символи. Необхідно мінімізувати універсум літер шляхом виключення незначних для класифікації символів.

Алгоритм визначення кластерів у вигляді підмножини послідовностей дій з універсуму примітивів на основі аналізу потоку даних, використовуючи зрізане число атрибутів.

1) Синтезувати квадратичну матрицю подібності послідовностей процесів (рис. 8).

2) Прибрати символи X, потім повторити побудову матриці подібності. Склеювати повторювані цифрові ідентифікатори послідовностей дій.

3) Розділити потік днями та операторами. Повторити побудову матриць подібності.

4) Розглянути можливість суттєвого зменшення символів алфавіту шляхом видалення праворуч несуттєвих диференціаторів.

5) Повторити побудову матриць подібності на мінімальному множині символів.

0.0	0.13400960828945000	0.04917119487354380	0.06820125433918990	0.04533042877744030	0.13865343254882600	0.005837307927746210	0.05538760660993240	0.0
0.0	0.0	0.16021377030235100	0.04928536780545550	0.16842554680827900	0.20038765470381400	0.015956796302356700	0.13396072159004400	0.005540510174220970
0.0	0.0	0.0	0.07440620438881340	0.17489600686236400	0.0951858804499107	0.04411281858847900	0.29195646562776400	0.0016973003718962500
0.0	0.0	0.0	0.0	0.10142093439855100	0.05863023054153540	0.011140246276971300	0.03231413021384780	0.01477639357761750
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.22130789859102500	0.004690725968196420	0.24044312439889100	0.0055851290422233100
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.006200139457040040	0.137137855148924	0.006871205913370990
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.016329516212738700	0.002352471009560550
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0028112634885094200
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Рис. 8. Матриця подібності послідовностей дій (Fig. 8. Matrix of similarity of action sequences)

Таблиця 11 – Таблиця кореляції векторів примітивів даних у матриці норми (0–1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	1.000	0.737	0.500	0.476	0.385	0.370	0.186	0.500	0.105	0.500	0.609	0.444	0.318	0.464	0.364	0.263	0.500	0.375	0.158	0.357	0.565
2	0.737	1.000	0.571	0.579	0.522	0.500	0.188	0.640	0.176	0.640	0.800	0.462	0.273	0.600	0.450	0.353	0.577	0.391	0.167	0.480	0.750
3	0.500	0.571	1.000	0.448	0.567	0.548	0.306	0.559	0.143	0.606	0.600	0.429	0.290	0.733	0.414	0.250	0.606	0.333	0.138	0.531	0.516
4	0.476	0.579	0.448	1.000	0.571	0.545	0.176	0.500	0.286	0.500	0.619	0.440	0.444	0.520	0.687	0.500	0.444	0.500	0.187	0.591	0.500
5	0.385	0.522	0.567	0.571	1.000	0.773	0.197	0.517	0.211	0.517	0.560	0.323	0.348	0.593	0.455	0.300	0.630	0.400	0.200	0.739	0.520
6	0.370	0.500	0.548	0.545	0.773	1.000	0.211	0.552	0.200	0.500	0.538	0.312	0.333	0.571	0.435	0.286	0.552	0.385	0.190	0.708	0.444
7	0.186	0.188	0.306	0.176	0.197	0.211	1.000	0.300	0.061	0.247	0.211	0.313	0.164	0.268	0.197	0.106	0.282	0.206	0.060	0.208	0.197
8	0.500	0.640	0.559	0.500	0.517	0.552	0.300	1.000	0.160	0.724	0.667	0.469	0.276	0.581	0.462	0.280	0.667	0.367	0.154	0.484	0.571
9	0.105	0.176	0.143	0.286	0.211	0.200	0.061	0.160	1.000	0.160	0.200	0.130	0.231	0.167	0.308	0.571	0.115	0.111	0.286	0.190	0.150
10	0.500	0.640	0.606	0.500	0.517	0.500	0.247	0.724	0.160	1.000	0.731	0.516	0.276	0.581	0.462	0.280	0.562	0.367	0.154	0.484	0.571
11	0.609	0.800	0.600	0.619	0.560	0.538	0.211	0.667	0.200	0.731	1.000	0.500	0.333	0.630	0.500	0.350	0.607	0.385	0.136	0.518	0.625
12	0.444	0.462	0.429	0.440	0.323	0.312	0.313	0.469	0.130	0.516	0.500	1.000	0.360	0.484	0.458	0.261	0.424	0.462	0.125	0.303	0.414
13	0.318	0.273	0.290	0.444	0.348	0.333	0.164	0.276	0.231	0.276	0.333	0.360	1.000	0.333	0.471	0.267	0.276	0.474	0.133	0.320	0.240
14	0.464	0.600	0.733	0.520	0.593	0.571	0.268	0.581	0.167	0.581	0.630	0.484	0.333	1.000	0.480	0.292	0.633	0.333	0.160	0.552	0.593
15	0.364	0.450	0.414	0.687	0.455	0.435	0.197	0.462	0.308	0.462	0.500	0.458	0.471	0.480	1.000	0.538	0.357	0.450	0.200	0.417	0.391
16	0.263	0.353	0.250	0.500	0.300	0.286	0.106	0.280	0.571	0.280	0.350	0.261	0.267	0.292	0.538	1.000	0.231	0.211	0.333	0.273	0.300
17	0.500	0.577	0.606	0.444	0.630	0.552	0.282	0.667	0.115	0.562	0.607	0.424	0.276	0.633	0.357	0.231	1.000	0.323	0.154	0.533	0.571
18	0.375	0.391	0.333	0.500	0.400	0.385	0.206	0.367	0.111	0.367	0.385	0.462	0.474	0.333	0.450	0.211	0.323	1.000	0.167	0.423	0.296
19	0.158	0.167	0.138	0.187	0.200	0.190	0.060	0.154	0.286	0.154	0.136	0.125	0.133	0.160	0.200	0.333	0.154	0.167	1.000	0.182	0.200
20	0.357	0.480	0.531	0.591	0.739	0.708	0.208	0.484	0.190	0.484	0.518	0.303	0.320	0.552	0.417	0.273	0.533	0.423	0.182	1.000	0.481
21	0.565	0.750	0.516	0.500	0.520	0.444	0.197	0.571	0.150	0.571	0.625	0.414	0.240	0.593	0.391	0.300	0.571	0.296	0.200	0.481	1.000
22	0.560	0.727	0.613	0.500	0.518	0.500	0.239	0.621	0.182	0.621	0.680	0.517	0.259	0.586	0.400	0.318	0.567	0.357	0.174	0.536	0.708
23	0.440	0.591	0.567	0.737	0.727	0.696	0.214	0.571	0.211	0.571	0.625	0.367	0.348	0.593	0.524	0.368	0.571	0.458	0.200	0.739	0.520
24	0.500	0.640	0.606	0.560	0.517	0.667	0.247	0.667	0.160	0.613	0.667	0.424	0.276	0.581	0.407	0.280	0.562	0.414	0.154	0.533	0.571

Classes=45 (sim>0.6)

[[0, 1, 10, 35, 43, 56, 58, 69], [], [2, 9, 13, 16, 21, 23, 60, 78], [3, 14, 22, 38, 59, 66, 76, 80, 81, 85, 89, 91, 92], [4, 5, 19], [], [6], [7, 77], [8], [], [], [11], [12, 46], [], [], [15, 32, 45, 51], [], [17], [18], [], [20], [], [], [24, 48], [25, 42, 53, 61], [26, 27, 29, 30, 36], [], [28, 37], [], [], [31, 55], [], [33, 34, 54], [], [], [], [39, 79], [40], [41, 47], [], [], [44], [], [], [], [49], [50], [], [52, 71], [], [], [], [57], [], [], [], [62, 87], [63], [64], [65], [], [67, 68], [], [], [70, 72], [], [], [73], [74], [75, 94], [], [], [], [82], [83], [84], [], [86], [], [88], [], [90], [], [], [93, 95, 96, 97, 98], [], [], [], [99], [100]]

Classes=28 (sim>0.5)

[[0, 1, 10, 20, 21, 30, 34, 35, 36, 38, 43, 44, 56, 58, 60, 61, 69, 71, 72, 76, 77, 84, 88], [], [2, 4, 5, 7, 9, 13, 16, 19, 22, 23, 40, 78], [3, 14, 25, 41, 46, 47, 48, 59, 66, 67, 68, 75, 79, 80, 81, 85, 89, 91, 92], [], [], [6], [], [8, 15], [], [], [11, 42, 90], [12], [], [], [], [17], [18], [], [], [], [24, 28, 29, 37], [], [26, 27, 33, 87], [], [], [], [31, 54, 55], [32, 45, 51, 53], [], [], [], [39], [], [], [], [49], [50], [52], [], [57], [], [], [], [62], [63, 64], [], [65], [], [], [70, 100], [], [73], [74], [], [], [], [82, 83], [], [], [86], [], [], [], [94], [], [], [99], []]

Виконати верифікацію розбиття шляхом перевірки схожості _ep рядків кожної послідовності дій, включеної до кластера. Кластери, складені за _ep рядками, є точне рішення, свого роду специфікація. Тому накладання двох квадратичних матриць подібності дасть можливість визначити якість розбиття шляхом обчислення інтегральної оцінки подібності за всіма відповідними координатами двох матриць:

$$S(S_i, S_j) = \frac{\sum_{i,j=1}^n \left[\min(M_{ij}, E_{ij}) \right]}{\sum_{i,j=1}^n \left[\max(M_{ij}, E_{ij}) \right]}$$

Приведення матриць до двійкового вигляду використовує нижню межу подібності, яка формується евристично: min={0,4 ∨ 0,5 ∨ 0,6}:

$$\text{if}(M_{ij} > \min) \cdot (M_{ij} = 1) \text{else}(M_{ij} = 0),$$

$$\text{if}(E_{ij} > \min) \cdot (E_{ij} = 1) \text{else}(E_{ij} = 0).$$

У двійковому вигляді оцінка подібності є більш адекватною та контрастною, яка формує подібність обох матриць:

$$S(M, E) = \frac{\sum_{i,j=1}^n (M_{ij} \wedge E_{ij})}{\sum_{i,j=1}^n (M_{ij} \vee E_{ij})}$$

У цьому випадку результуюча S-матриця подібності також матиме двійковий вигляд, а інтегральний критерій S(M, E) показуватиме точність кластеризації послідовностей дій, яка приведена до специфікації, що створюється _ep рядками. Обчислення подібності через різницю між двома матрицями:

$$S(M, E) = 1 - D(M, E) = 1 - \frac{\sum_{i,j=1}^n (M_{ij} \oplus E_{ij})}{\sum_{i,j=1}^n (M_{ij} \vee E_{ij})} = 1 - \frac{15}{64} \approx 0,77$$

представлені таблицями рис. 10.

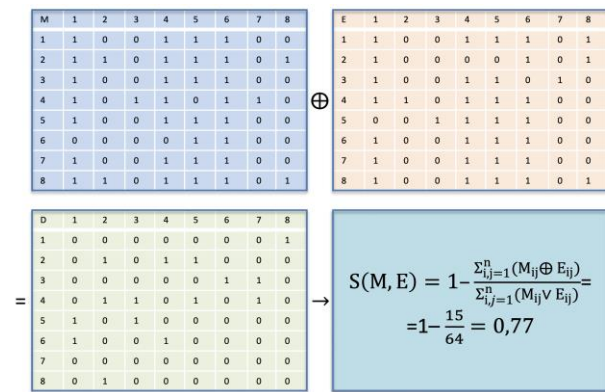


Рис. 10. Обчислення подібності
(Fig. 10. Similarity calculation)

5. Висновки та перспективи

Запропоновано та реалізовано метод пошуку та розпізнавання патернів на основі векторного завдан-

ня слів, речень та інших символічних послідовностей, які ідентифікують бізнес-патерни у потоках великих даних.

Метод використовує унітарне кодування інформаційних примітивів та даних, які далі подаються у вигляді послідовності або двійкового вектора, який описує бізнес-патерн або функціональність, виконану оператором під час робочого дня.

Структури даних, засновані на унітарному кодуванні інформації, можуть бути оброблені в паралельному режимі за допомогою основних логічних операцій, що формують подібності та відмінності патерн-векторів, чим досягається висока продуктивність обробки великих даних з метою аналізу робочого дня оператора.

Практична реалізація векторного методу дозволила створити програму розпізнавання патернів у потоці великих даних з ймовірністю з ймовірністю 0,77%.

REFERENCES

- (2021), *Gartner Top 6 Trends Impacting Infrastructure & Operations in 2021*, available at: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-6-trends-impacting-infrastructure-operations-in-2021>.
- Joshi A. (2020), *Machine Learning and Artificial Intelligence*, Springer Nature Switzerland AG, 261 p., doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26622-6>.
- (2021), *IEEE Guide для Архитектурної Framework ma Application of Federated Machine Learning*, IEEE Std 3652.1-2020, 69 p., , available at: <https://lib.ugent.be/catalog/ebk01:5590000000440557>.
- Bolte F., Nourani, M., Ragan, E. and Bruckner, S. (2020), "SplitStreams: A Visual Metaphor for Evolving Hierarchies", *IEEE Trans. on Vis. & Computer Graphics*, vol. 27, no. 08, pp. 3571-3584, doi: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2973564>.
- Huang, J.-W., Lee, P.-J. and Jaysawal, B.P. (2022), "Multiscale Control Chart Pattern Recognition Using Histogram-Based Representation of Value and Zero-Crossing Rate", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 1, pp. 684-693, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3050355>.
- Han, H., Li, W., Feng, Z., Fang, G., Xu, Y. and Xu, Y. (2021), "Proceed From Known to Unknown: Jamming Pattern Recognition Under Open-Set Setting", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 693-697, April 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3140145>.
- Zhang, F., Xu, M. amd Xu, C. (2022), "Weakly-Supervised Facial Expression Recognition в Wild with Noisy Data", *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 24, pp. 1800-1814, doi: <https://doi.org/10.1109/TMM.2021.3072786>.
- (2022), "Pattern Recognition", Schintler L.A., McNeely CL (eds), *Encyclopedia of Big Data*, Springer, Cham, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32010-6_300166.

Received (Надійшла) 21.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРКУ / ABOUT THE AUTHOR

Хаханова Ганна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Hanna Khakhanova – Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of Computer Aided Design of Computers Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: anna.hahanova@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1318-7973>.

A vector method for finding sequences in big data

Hanna Khakhanova

Annotation. A technological software solution is proposed for metric search and identification of logical-temporal patterns of a business data flow by creating additional vector data structures and a parallel method for their processing. **The subject of research** is the methods of searching and identifying logical-temporal patterns in big data. **The purpose of the study** is to increase the efficiency of searching and recognizing logical-temporal patterns that semantically form business functionality in an 8-hour frame of screenshots with "garbage" data. **Applied methods:** apparatus of set theory and Boolean algebra, metric models for determining parameters for sets of binary vectors, elements of probability theory, theory of algorithms, software modeling. **The results obtained:** a method for searching and recognizing patterns based on a vector problem of character sequences that identify patterns in big data streams using unitary coding of information primitives and data; vector models are unitary-encoded data structures for describing a big data flow as Cartesian products of a set of primitive-string-markers and a discrete sequence of implementation of a given time frame. **The practical significance of the work:** the implementation of the vector method, which made it possible to create a pattern recognition program in a big data stream with a probability of 0.77%.

Keywords: logical-temporal patterns; business functionality; time frame; search and identification; union intersection metric; code verification.

Information systems modeling

УДК 519.237.4

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.03>

І. В. Григоренко, С. М. Григоренко, О. В. Жук

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

ВИКОРИСТАННЯ ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ПОБУДОВІ МОДЕЛІ ФАКТОРНОГО ВПЛИВУ НА РЕЗУЛЬТАТ ДИСТАНЦІЙНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. Розглянуто вирішення науково-практичної задачі використання дисперсійного аналізу для побудови моделі факторного впливу на результат дистанційного теплового контролю біологічних об'єктів. Представлено модель впливу на результат вимірювання температури біологічного об'єкту чотирьох факторів, що негативно впливають на точність вимірювання температури, а саме: температура повітря, запиленість повітря, яскравість світлового випромінювання, вологість повітря. Розглянута схема дії зазначених факторів. Отримані результати базуються на тім, що дисперсійний аналіз – це метод статистичної оцінки надійності проявлення залежності результативної ознаки від одного або кількох факторів. Зроблено висновки, що отримані результати дають змогу подальшого удосконалення методів обробки результатів безконтактного вимірювання температури біологічних об'єктів. Представлені перспективи подальших досліджень розробленої моделі, а саме те, що є змога отримати рівняння для оцінювання достовірності статистичних висновків про інформаційну значимість показників контролю температури; отримання аналітичних співвідношень, що дадуть змогу оцінити кількість інформації для кожного з показників контролю температури при факторному впливі на функцію перетворення цих показників з тим, щоб ранжирувати показники контролю температури за зменшенням їх чутливості до зміни рівнів параметра температурного контролю.

Ключові слова: біологічний об'єкт; вимірювання температури; безконтактний метод; інфрачервона термографія; дисперсійний аналіз.

Вступ

На тлі проблеми поширення Коронавірусної інфекції (*COVID 19*) Медичні працівники та працівники ветеринарної служби зацікавлені у вимірюванні і моніторингу температури тіла людей і тварин, особливо коли вони знаходяться у скупченні. Ця зацікавленість, основана на безпосередніх залежностях між патологічними станами і температурою тіла біологічних об'єктів. Більшість захворювань супроводжуються відхиленням температури тіла від нормальної (для людей приймають $36,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), а отже, застосування безконтактних методів вимірювання температури, дає можливість своєчасно виявляти потенційно хворих у скупченні. Це дає можливість своєчасно ізолювати хворого від соціуму.

Методи безконтактного вимірювання температури вже давно знаходять широке застосування в медичній практиці, особливо там, де прямий контакт вимірювального обладнання з біологічним об'єктом неможливий, важкодоступний або взагалі небажаний. Використання таких методів передбачає визначення температури на основі неінвазивно виміряних значень інтенсивності теплового випромінювання з поверхні тканин [1].

Безконтактне вимірювання температури біологічних об'єктів стає можливим за рахунок застосування технології сенсора інфрачервоного випромінювання ($\lambda = 9,35 \dots 9,19\text{ мкм}$). Сенсори інфрачервоного випромінювання, зокрема термобатарей, призначені для вимірювання температури віддалених або недосяжних об'єктів. Сенсори інфрачервоного випромінювання зарекомендували себе якнайкраще, зокрема у вузьких діапазонах температур досягнуто результатів з точністю в межах $0,01\text{ K}$ [2].

Інфрачервона термографія – це методика застосування спеціальних електронно-оптичних пристроїв, що реєструють і вимірюють величину теплового потоку. Найпростіші тепловізори здатні створювати відеосигнал, у якому білі області відображають максимуми випромінюваної енергії, а темні області вказують на більше низький рівень теплового випромінювання.

Тепловізор – це прилад, призначений для відображення сигналів, частотні характеристики яких лежать нижче діапазону оптичного спектра. Ця особливість дозволяє одержувати фотознімки або відеозображення теплової картини об'єкта, бо межа виявлення теплових розходжень сучасними тепловізорами дуже мала – усього $0,01$ градуса [2, 3].

Квадрокоптер з тепловізором часто використовується в багатьох областях, у тому числі – для розвідки вогнищ пожеж, пошуку витоків газу, для вилученого контролю ліній електропостачання (ЛЕП), для охорони територій і периметрів, для пошуку людей і тварин. Активно використовують «літаючий тепловізор» рятувальники, військові, мисливці. Виготовленням квадрокоптеру з тепловізором займаються багато компаній по всьому Світу.

Аналіз основних досліджень і публікацій. У роботах [4 – 6] пропонується використовувати для вимірювання температури біологічних об'єктів саме квадрокоптер з тепловізором.

Однак при використанні засобів безконтактної термометрії треба враховувати вплив факторів, що заважають отримувати достовірні результати вимірювання температури, а саме: засвічування від сторонніх предметів (KF), випромінювання досліджуваної поверхні (T), коефіцієнта пропускання проміжного середовища (K_A), значення випромінювання від земної

поверхні (K_G), розігрів об'єкту від сонячного світла (K_S), пропускання оптичного каналу (K_O). Всі ці впливаючі фактори ускладнюють точне визначення температури і повинні бути враховані під час опрацювання результатів вимірювання. Пропонується використовувати метод дисперсійного аналізу при побудові моделі факторного впливу на результат дистанційного теплового контролю біологічних об'єктів.

Із [3] відомо, що повна енергія, яка випромінюється з одиниці поверхні біологічного об'єкту в одиницю часу визначається законом Стефана-Больцмана:

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1)$$

де $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$ – стала Стефана-Больцмана;

ε – випромінювальна здатність, що залежить від матеріалу (шкіра людини) та від температури його поверхні ($\varepsilon < 1$);

T – температура біологічного об'єкту (шкіра людини).

У роботі [3] зазначено, що оскільки випромінювальна здатність залежить від довжини хвилі, то зв'язок між дійсною і вимірюваною температурою визначається виразом:

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{T_n} + \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2(\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}, \quad (2)$$

де $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ – друга константа випромінювання;

ε_{λ_1} і ε_{λ_2} – коефіцієнти випромінювальної здатності біологічного об'єкту, на довжинах хвиль λ_1 і λ_2 ;

λ_1 і λ_2 – робоча і спектральна смуга оптично-приймальної системи тепловізора.

На рис. 1 представлено схему впливу навколишнього середовища на випромінювання об'єкта контролю і внаслідок цього на сам результат вимірювання температури безконтактним засобом вимірювання (квадрокоптером із тепловізором).

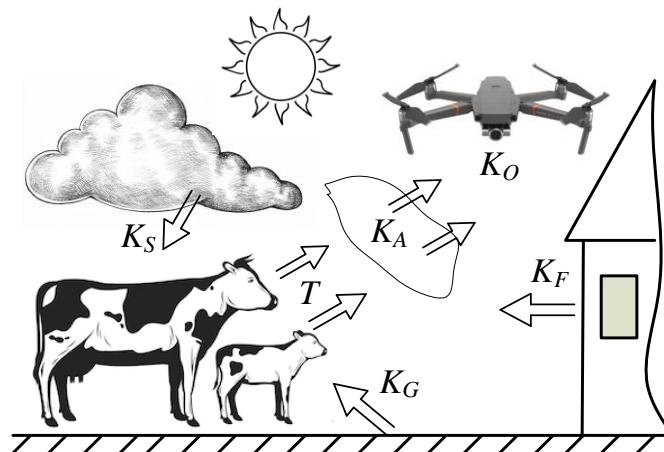


Рис. 1. Схему впливу навколишнього середовища на випромінювання об'єкта контролю
(Fig. 1. Scheme of the environment influence on the radiation of the control object)

На практиці не завжди є можливість вимірювати температуру людини або тварини засобом безконтактного контролю заздалегідь обравши місце, в якому у процесі вимірювання не проявляється дія факторів, що негативно впливають на точність вимірювання температури. Тому треба розробити модель факторного впливу, яка буде враховувати найбільш важливі фактори, що негативно впливають на результат вимірювання. Це можливо зробити використовуючи дисперсійний аналіз.

У роботі [7] зазначено, що дисперсійний аналіз – це метод статистичної оцінки надійності проявлення залежності результативної ознаки від одного або кількох факторів, що негативно впливають на точність вимірювання температури. За допомогою методу дисперсійного аналізу проводиться перевірка статистичних гіпотез відносно середніх в кількох генеральних сукупностях, які мають нормальний розподіл. Вказано, що дисперсійний аналіз дає змо-

гу встановити, наскільки вибіркові показники зв'язку результативного і факторних ознак достатні для поширення одержаних за вибіркою даних на генеральну сукупність. Достоїнством цього методу є те, що він дає досить надійні висновки по вибірках невеликої чисельності.

Досліджуючи варіацію результативної ознаки під впливом одного або кількох факторів за допомогою дисперсійного аналізу можна одержати крім загальних оцінок істотності залежностей, також і оцінку відмінностей у величині середніх, що формуються при різних рівнях факторів, та істотності взаємодії факторів, що негативно впливають на точність вимірювання [7].

Основний матеріал

Дисперсійний аналіз базується на ряді припущень стосовно випадкових величин та параметрів, що формують помилку експерименту [8 – 12]:

– математичне сподівання кожної залишкової випадкової величини дорівнює нулю, тобто систематична складова відсутня;

– залишкові випадкові величини взаємно незалежні. Ця вимога означає, що дисперсія суми всіх залишкових випадкових величин дорівнює сумі дисперсій цих величин;

– всі залишкові випадкові величини мають однакове середньоквадратичне відхилення.

– кожна залишкова випадкова величина розподілена за нормальним законом. Зазначене припущення, як правило, не виконується, але навіть істотні відхилення від нормального закону не роблять помітного впливу на процедуру аналізу.

Основним поняттям дисперсійного аналізу є поняття фактору – якості або властивості, відповідно до якої класифікуються дані і кожний фактор має кілька рівнів. Структурна схема експерименту описується, факторами що входять до нього і способами комбінування різних факторів на різних рівнях.

У нашому випадку на біологічний об'єкт контролю впливає декілька факторів, що негативно впливають на точність вимірювання температури, які не піддаються стабілізації або важко контролюються, але які викликають похибку вихідної величини. У такому випадку варто провести процедуру рандомізації для того, щоб зробити їхній вплив випадковим.

При багатофакторному експерименті від того, яка буде обрана модель, що залежить від способу взаємодії факторів.

У практиці дисперсійного аналізу розрізняють два види взаємодій факторів – ієрархічна та перехресна класифікації.

При ієрархічній класифікації розрізняють фактори основної групи й фактори підгруп, причому кожний рівень одного основного фактору може бути пов'язаний з безліччю рівнів другого фактору – фактору підгрупи [8, 9].

При перехресній класифікації кожен рівень одного фактору можуть сполучатися з усіма рівнями іншого фактору й упорядкування всіх взаємодій у цьому випадку, на відміну від ієрархічної класифікації, неможливо [8, 9].

Припустимо, що T – параметр, що характеризує випромінювання досліджуваної поверхні, який треба вимірювати, а P_1, \dots, P_n – показники контролю, що визначаються у процесі вимірювань (наприклад, температура повітря, запиленість повітря, яскравість світлового випромінювання, вологість повітря).

Результат спостереження значення кожного з показників контролю можна записати у вигляді математичної моделі, у якій факторами, що впливають є T та $(n - 1)$ факторів, зумовлених мінливістю показників контролю, що залишилися. Це твердження зумовлене тим фактом, що показники, що залишилися характеризують кількісно $(n - 1)$ властивості об'єкта контролю та відрізняються від параметру теплового контролю T , тим, що є можливість прямого вимірювання їх рівнів.

Отже, результат спостереження залежить від n факторів, що впливають.

Модель при дисперсійному аналізі має такий вигляд [8, 9]:

{ (Значення, що спостерігається) = Σ (Фактори, що описують ефекти, що визначаються) + Σ (Випадкові величини, що описують залишкові ефекти) }.

Для безконтактного вимірювання температури біологічного об'єкту розглянемо модель впливу на результат вимірювань показника контролю P_{abcd} при чотирьох факторах, що впливають (ε_a та факторах, рівні яких кількісно відображені значеннями трьох показників контролю, що залишилися (температура повітря, яскравість світлового випромінювання, вологість повітря). Вона має вигляд:

$$P_{abcd} = \bar{P} + \varepsilon_a + \alpha_b + \beta_c + \chi_d + (\varepsilon\alpha)_{ab} + (\varepsilon\beta)_{ac} + (\varepsilon\chi)_{ad} + (\alpha\beta)_{bc} + (\beta\chi)_{cd} + (\alpha\chi)_{bd} + (\varepsilon\alpha\beta\chi)_{abcd} + d_{abcd}, \quad (3)$$

де a, b, c, d – номери рівнів факторів, що впливають; ε_a – відхилення результату вимірювання показника P_{abcd} від його середнього значення \bar{P} , обумовлене впливом параметру T ;

$\alpha_b, \beta_c, \chi_d$ – відхилення результату вимірювання P_{abcd} від \bar{P} , обумовлене трьома факторами, що залишилися;

$(\varepsilon\alpha)_{ab}, (\varepsilon\beta)_{ac}, (\varepsilon\chi)_{ad}, (\alpha\beta)_{bc}, (\beta\chi)_{cd}, (\alpha\chi)_{bd}$ – відхилення, обумовлене парними взаємодіями усіх факторів, що впливають;

$(\varepsilon\alpha\beta\chi)_{abcd}$ – відхилення, обумовлене взаємодією чотирьох факторів, що впливають;

d_{abcd} – випадковий залишок.

Початковими умовами для моделі (3) будуть такі рівності:

$$\sum_a \varepsilon_a = 0; \quad \sum_b \alpha_b = 0; \\ \sum_c \beta_c = 0; \quad \sum_d \chi_d = 0$$

$$\sum_a (\varepsilon\alpha)_{ab} = 0; \quad \sum_b (\varepsilon\alpha)_{ab} = 0;$$

$$\sum_a (\varepsilon\beta)_{ac} = 0; \quad \sum_c (\varepsilon\beta)_{ac} = 0;$$

$$\sum_a (\varepsilon\chi)_{ad} = 0; \quad \sum_d (\varepsilon\chi)_{ad} = 0;$$

$$\sum_b (\alpha\beta)_{bc} = 0; \quad \sum_c (\alpha\beta)_{bc} = 0;$$

$$\sum_b (\alpha\chi)_{bd} = 0; \quad \sum_d (\alpha\chi)_{bd} = 0;$$

$$\sum_c (\beta\chi)_{cd} = 0; \quad \sum_d (\beta\chi)_{cd} = 0.$$

$$\sum_a (\varepsilon\alpha\beta\chi)_{abcd} = 0; \quad \sum_b (\varepsilon\alpha\beta\chi)_{abcd} = 0;$$

$$\sum_c (\varepsilon\alpha\beta\chi)_{abcd} = 0; \quad \sum_d (\varepsilon\alpha\beta\chi)_{abcd} = 0;$$

$$\sum_a \sum_b \sum_c \sum_d d_{abcd} = 0.$$

Крім цих умов на випадковий залишок накладені обмеження:

1) усі випадкові залишки d_{abcd} є взаємно незалежними;

$$2) M[d_{abcd}^2] = \sigma^2;$$

3) випадкові величини d_{abcd} розподілені по нормальному закону.

Що стосується виду відхилень $\varepsilon_a, \alpha_b, \beta_c, \chi_d$, то на них будуть накладені такі умови:

1) ε_a – є випадковою величиною, оскільки вона відображає ефект апріорно невизначених рівнів параметру контролю T ;

2) $\alpha_b, \beta_c, \chi_d$ – є метрологічна визначеними параметрами показників контролю.

Модель, задана виразом (3), не є виключно параметричною, із-за випадкових рівнів параметру колориметричного контролю T . Її слід віднести до змішаних моделей.

Висновки

1. Для безконтактного вимірювання температури біологічного об'єкту запропонована модель впливу на результат вимірювань показника контролю P_{abcd} при чотирьох факторах, що впливають. Модель враховує ефекти одночасної взаємодії факторів (температура повітря, яскравість світлового випромінювання, вологість повітря). Представлена модель дає змогу при подальших дослідженнях визначити обмеження на кількість рівнів основного параметру контролю та факторів, що впливають на результат вимірювання при заданій метрологічній невизначеності параметра контролю.

2. У подальших дослідженнях представленої моделі є змога отримати рівняння для оцінювання достовірності статистичних висновків про інформаційну значимість показників контролю температури.

3. Перспективним є отримання аналітичних співвідношень, що дадуть змогу оцінити кількість інформації для кожного з показників контролю температури при факторному впливі на функцію перетворення цих показників з тим, щоб ранжувати показники контролю температури за зменшенням їх чутливості до зміни рівнів параметра температурного контролю.

REFERENCES

- Shuangbao, Shu, Huajun, Liang, Yu, Zhang, Yuzhong, Zhang and Ziqiang, Yang (2022), "Non-contact measurement of human respiration using an infrared thermal camera and the deep learning method", *Measurement Science and Technology*, Vol. 33, No. 7, 075202, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac5ed9>.
- Anderson, J., Kaplan-Stein, S., Adolph, S. and Peralta, J.M. (2020), "Assessment of Non-Contact Infrared Thermometer Measurement Sites in Birds", *Journal of Applied Animal Welfare Science*, Vol. 23(2), pp. 131-139, doi: <https://doi.org/10.1080/10888705.2019.1664303>.
- Shlykov V.V. and Volyniy O.M. (2018), Microprocessor temperature control system. Internauka: International Scientific Journal. No. 13. P. 66-68.
- Hryhorenko, S.M., Hryhorenko, I.V. and Zhuk, O.V. (2020), "Analysis of problems of thermal control of biological objects", *Theoretical and practical research of young scientists*, XIV International scientific and practical conference of masters and postgraduate students, Kharkiv: NTU «KHP», Kharkiv, pp. 135-136.
- Hryhorenko, S.M., Hryhorenko, I.V. and Zhuk, O.V. (2021), "Application of microcontroller systems for remote thermal control of biological objects", *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: XXIX International. of science-practice conf*, Vol. 2, NTU "KhPI", Kharkiv, p. 299.
- Zhuk, O.V., Hryhorenko, S.M. and Hryhorenko, I.V. (2021), "Planning an experiment to determine the temperature of biological objects", *Theoretical and practical research of young scientists: XV International scientific and practical conference of masters and postgraduate students*, NTU "KhPI", Kharkiv, p. 70.
- Diskaeva, E.I., Vechev, O.V., Bazikov, I.A. and Maltsev, A.N. (2019), "Dispersion analysis of niosomes different composition", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 21(1), Article number: 21 (2019), doi: <https://doi.org/10.1007/s11051-018-4453-6>.
- Yefymenko, S. A. (2020), "Analysis of the influence of the uncertainty of measurement results on the reliability of colorimetric control", *Metrolohiya ta pryklady*, Kharkiv, No 6 (86), pp. 52–58.
- Barnes, L., Blumenau, J., Lauderdale, B.E. (2022), "Measuring Attitudes toward Public Spending Using a Multivariate Tax Summary Experiment", *American Journal of Political Science*, Vol. 66(1), pp. 205-221, doi: <https://doi.org/10.1111/ajps.12643>.
- Fokianos, K., Fried, R., Khari, Yu. and Voloshko, V. (2021), "Statistical analysis of multivariate discrete-valued time series", *Journal of multivariate analysis*, Vol. 188, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2021.104805>.
- Hryhorenko, I., Kondrashov, S., and Hryhorenko, S. (2021), "Development and research of the parameters control system of the artificial ecosystem environment by the fuzzy-logic system", *Advanced Information Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 49–54, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.07>
- Prabhaker, Mishra, Chandra Mani, Pandey, Uttam, Singh, Amit, Keshri and Mayilvaganan, Sabaretnam (2019), "Selection of Appropriate Statistical Methods for Data Analysis", *Annals of cardiac anaesthesia*, no. 2 (3) , pp. 297–301, doi: https://doi.org/10.4103/aca.ACA_248_18.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Shuangbao Shu, Huajun Liang, Yu Zhang, Yuzhong Zhang and Ziqiang Yang. Non-contact measurement of human respiration using an infrared thermal camera and the deep learning method. *Measurement Science and Technology*. 2022. Vol. 33, No. 7. 075202. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac5ed9>.

2. Anderson J., Kaplan-Stein S., Adolph S., Peralta J.M. Assessment of Non-Contact Infrared Thermometer Measurement Sites in Birds. *Journal of Applied Animal Welfare Science*. 2020. Vol. 23(2), pp. 131-139, doi: <https://doi.org/10.1080/10888705.2019.1664303>.
3. Шликов В. В., Воляник О. М. Мікропроцесорна система контролю температури. *Інтернаука* : Міжнародний науковий журнал. 2018. № 13. С. 66-68.
4. Григоренко С. М., Григоренко І. В., Жук О. В. Аналіз проблем теплового контролю біологічних об'єктів. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : XIV Міжнародна науково-практична конференція магістрів та аспірантів. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. С. 135-136.
5. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Жук О. В. Застосування мікроконтролерних систем для дистанційного теплового контролю біологічних об'єктів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : XXIX Міжнар. наук. – практ. конф. Том 2. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. С. 299.
6. Жук О. В., Григоренко С. М., Григоренко І. В. Планування експерименту по визначенню температури біологічних об'єктів. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : XV Міжнародна науково-практична конференція магістрів та аспірантів. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. С. 70.
7. Diskaeva E.I., Vecher O.V., Bazikov I.A., Maltsev A.N. Dispersion analysis of niosomes different composition, *Journal of Nanoparticle Research*, 2019. Vol. 21(1). Article number: 21 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-018-4453-6>.
8. Єфименко С. А. Аналіз впливу невизначеності результатів вимірювань на достовірність колориметричного контролю. *Метрологія та прилади*. Харків, 2020. № 6 (86). С. 52–58.
9. Barnes, L., Blumenau, J., Lauderdale, B.E. Measuring Attitudes toward Public Spending Using a Multivariate Tax Summary Experiment, *American Journal of Political Science*, 2022. Vol. 66(1). P. 205-221, DOI: <https://doi.org/10.1111/ajps.12643>.
10. Fokianos K., Fried R., Kharin Yu., Voloshko, V. Statistical analysis of multivariate discrete-valued time series. *Journal of multivariate analysis*. 2022. Vol. 188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2021.104805>.
11. Григоренко І., Кондрашов С. Григоренко С. Розробка та дослідження системи контролю параметрів середовища штучної екосистеми апаратом fuzzy-logic. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 4, С. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.07>.
12. Prabhaker Mishra, Chandra Mani Pandey, Uttam Singh, Amit Keshri, Mayilvaganan Sabaretam. Selection of Appropriate Statistical Methods for Data Analysis. *Annals of cardiac anaesthesia*. 2019. No. 2 (3), P. 297–301. DOI: https://doi.org/10.4103/aca.ACA_248_18.

Received (Надійшла) 15.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Григоренко Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Ihor Hryhorenko – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Measuring Technologies and Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: grigmaestro@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4905-3053>.

Григоренко Світлана Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю і діагностики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна;

Svitlana Hryhorenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer and Radio-Electronic Control Systems and Diagnostics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: sngloba@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5375-9534>.

Жук Олександр Васильович – аспірант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Oleksandr Zhuk – postgraduate of the Department of computer and radio-electronic control systems and diagnostics National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. e-mail: seozavr@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1496-2836>.

Use of dispersion analysis in building a model of factor influence on the result of remote thermal control of biological objects

Ihor Hryhorenko, Svitlana Hryhorenko, Oleksandr Zhuk

Abstract. The solution to the scientific and practical problem of using dispersion analysis to build a model of factor influence on the result of remote thermal control of biological objects is considered. A model of the effect on the result of measuring the temperature of a biological object of four factors that negatively affect the accuracy of temperature measurement is presented, namely: air temperature, air dustiness, global radiation brightness, air humidity. The scheme of action of the specified factors is considered. In practice, it is not always possible to measure the temperature of a person or an animal by means of non-contact control by choosing a place in advance in which the influence of factors that negatively affect the accuracy of temperature measurement is not manifested during the measurement process. Therefore, it is necessary to develop a factor influence model that will take into account the most important factors that negatively affect the measurement result. This can be done using variance analysis. It was concluded that the obtained results enable further improvement of the methods of processing the results of non-contact temperature measurement of biological objects. Prospects for further research of the developed model are presented, namely, that it is possible to obtain an equation for evaluating the reliability of statistical conclusions about the informational significance of temperature control indicators; obtaining analytical ratios that will make it possible to estimate the amount of information for each of the temperature control indicators under the factorial influence on the transformation function of these indicators in order to rank the temperature control indicators according to the decrease in their sensitivity to changes in the temperature control parameter levels.

Keywords: biological object; temperature measurement; non-contact method; infrared thermography; dispersion analysis.

Lev Raskin¹, Yuriy Ivanchikhin¹, Larysa Sukhomlyn², Iaroslav Svyatkin¹, Roman Korsun¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

²Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

EVALUATION MODEL OF THE RECOVERY PROCESSES OF NON-MARKOVIAN SYSTEMS, CONSIDERING THE ELEMENTS UNRELIABILITY UNDER ARBITRARY DISTRIBUTION LAWS

Abstract. The subject of the study is the reliability of recoverable non-Markovian systems, functioning of which is described by arbitrary distribution laws. The purpose of the article is to develop a mathematical model of the functioning of modern computer systems under arbitrary laws of the distribution of stay duration in each of the states, taking into account the recovery system and the provision of spare elements. The main task is to develop an adequate model of the system functioning process, taking into account the non-Markovian character of the processes occurring in the system, its possible large dimension, and the presence of a hierarchical recovery system. Based on this model, a method for calculating the density of the system recovery time distribution has been developed. At the same time, a universal four-parameter distribution is proposed to describe random processes occurring in the system. Using this approximation, the calculation of the desired parameter of the recovery flow is performed by solving the Volterra integral equation with a difference kernel.

Keywords: restoration of non-Markovian systems; mathematical model of reliability; density of the recovery time distribution.

Introduction

Problem Statement. In the last decade, due to the wide spread of the Internet, the so-called “cloud technologies” have been rapidly developing, structurally implemented as complex software and hardware complexes representing Multi-Position Distributed Systems (MPDS). From the hardware point of view, these are complex, spatially and functionally distributed multi-level hierarchical structures consisting of many functional subsystems - groups of radio electronic and computer systems (RECS), united by means of network communication and control. The main features of the MPDS in comparison with single-position systems are as follows: presence of structural and information redundancy arising from the interaction of RECS groups, use of spatial-temporal methods of multidimensional processing of measurement information, large amounts of data (*BigData* technology), unified synchronization of connections between the systems included in MPDS, variety of principles of RECS technical implementation and computational means of ensuring the “cloud” storage, information processing and transmission, high requirements for the reliability of elements and subsystems, etc.

In the process of functioning, elements and modules of all subsystems often fail. The concept of failure is understood as a complete or partial loss of operability by object, which is a consequence of environmental factors impact (temperature, humidity, vibration), internal physical-chemical processes, as well as continuous operation in loaded modes, violations of operating modes, maintenance, software failures, etc.

In order to guarantee the high reliability of such complex long-term MPDS for their hardware component, the following methods of reliability increasing are currently used [1-4, 6, 9, 11]:

- redundancy of unreliable or especially important elements and their blocks;

- reducing the failure rate of elements and the entire system;
- reduction of continuous operation time in especially loaded modes;
- reduction of the average recovery time, etc...

In order to guarantee high reliability and efficiency of MPDS, based on the possibilities of practical implementation and the degree of efficiency, the most significant for the hardware component of MPDS is the formation of self-control system and spare standard elements provision (SCSSSEP). At the same time, each individual RECS is given a set of standard spare parts containing a certain number of replacement elements of all necessary types. To replenish the spare parts SPTA, a group (SPTA-G) is used, which is attached to the entire MPDS both to replenish the spare parts and to ensure reliability for certain types absent in the nomenclature of single spare parts. In addition, a common repair body (RB) is distinguished in the structure of the entire SCSSSEP, the functioning of which consists in eliminating failures by identifying and replacing (repairing) hierarchically smaller failed structural elements in faulty elements [4-6, 11].

To solve the problem of optimal synthesis of restoration and maintenance system SCSSSEP of MPDS, it is necessary to develop methods for analyzing the effectiveness of RECS functioning together with SCSSSEP, using the parameters of the structure and configuration of the spare parts and providing a target function of the form

$$P = f(\bar{X}),$$

where P is the efficiency indicator of MPDS, \bar{X} is the vector of SCSSSEP parameters. To construct mathematical models of the functioning of both individual RECS and MPDS, the theory of random processes and queuing theory are used today in the vast majority of cases, focused mainly on the exponential distribution of failure and recovery flows [1-6, 9, 12-17]. Several types of indicators are recommended to

evaluate the effectiveness of modern RECS, taking into account the reliability. The main ones are [1,3,11]:

- probability of uptime for a given time $t_0: P(t_0)$;
- average operating time to failure: $\overline{T_O}$;
- average recovery time: $\overline{T_R}$;
- system availability coefficient for reliability K_R ;
- operational readiness coefficient for time $t_0: R(t_0)$.

It should be noted that the traditionally used models for evaluating the MPDS effectiveness, taking into account the reliability of its elements, are focused on assumptions about the exponential distribution of the uptime of all types of elements and their recovery time, and about the relatively small dimension of tasks. This ensures the formation of elegant and simple mathematical models, but, of course, imposes certain limitations on the level of accuracy of the results obtained using these models. Analysis of the problems RECS with SCSSSEP effectiveness evaluation shows [1-6,9,11], that only particular problems of this problem can be solved by existing analytical methods using sufficiently strict restrictions on the number of variables, the laws of distribution of failure flows and recoveries, the structure and options for SCSSSEP construction, maintenance processes using the assumption that maintenance updates the system completely.

Thus, the tasks of analyzing the effectiveness of MPDS functioning, taking into account the structure, composition, options for strategies for replenishment, control and maintenance of spare parts kits, as well as the synthesis of hierarchical spare parts of the optimal structure and quantitative composition, despite a large number of developments and publications on this topic, remain relevant. This is due to the lack of a sufficiently general methodology for assessing the MPDS effectiveness, which would allow expanding the space of the analyzed parameters, would provide the possibility of using non-Markovian laws of failure flow distribution and recoveries and obtaining the final quantitative results.

The article attempts to construct a general mathematical model of RECS functioning, taking into account the recovery system. Analysis of the functioning of such a generalized system will allow to obtain the laws of RECS recovery times distribution, necessary for calculating the MPDS functioning efficiency, taking into account reliability.

Main Results

Development of a mathematical model of non-Markovian functioning systems taking into account the recovery system. Consider an MPDS consisting of S of one-type RECS, each of which is given its own set of spare parts. All single sets of spare parts are closed to a group set of SPTA-G. Let's assume that the average failure rate of elements of the j -type of the RECS set when operating under current as part of the equipment is

equal to $\lambda_T^{(j)}$, and in storage mode – $\lambda_{ST}^{(j)}$. When transferring elements from storage mode to operation mode under current, their failure rate becomes equal to $\lambda_T^{(j)}$. Then, when the RECS is operating in standby mode, the failure rate of elements of the j -type of the RECS aggregate can be written as follows [3]:

$$\lambda^{(j)} = \lambda_T^{(j)} K_u + \lambda_{ST}^{(j)} (1 - K_u), \quad (1)$$

where K_u the intensity coefficient of equipment operation. The cyclicity of RECS operation has a significant impact on their reliability and to account for this effect on the failure rate of RECS elements, the ratio (1) can be written as follows [3, 5]:

$$\lambda_C^{(j)} = \lambda_T^{(j)} (1 + \rho_j \gamma), \quad (2)$$

where ρ_j is a coefficient showing how many times the failure rate of j -type elements increases with each turn on of the RECS equipment, γ is a coefficient characterizing the average number of turns on of the RECS equipment per hour. At this

$$\lambda^{(j)} = \lambda_C^{(j)} K_u + \lambda_{ST}^{(j)} (1 - K_u). \quad (3)$$

The models given below characterize an arbitrary k -th interval of RECS operation, the index k will be omitted in the future for convenience of recording.

Suppose that the RECS has in its composition a set of elements that are homogeneous in characteristics. Duration of their uptime is a continuous random variable with a distribution density that $f_0(\underline{\varepsilon}(t), t)$ is a function of the conditions and operating modes of the system $\underline{\varepsilon}(t)$, as well as their lifetime t , and

$$\begin{aligned} f_0(\underline{\varepsilon}(t), t) &= \lambda(\underline{\varepsilon}(t), t) P(\underline{\varepsilon}(t), t) = \\ &= \lambda(\underline{\varepsilon}(t), t) \exp\left(-\int_0^t \lambda(\underline{\varepsilon}(x), x) dx\right), \end{aligned} \quad (4)$$

where $\lambda(\underline{\varepsilon}(t), t)$ is the failure rate of the elements as a function of the conditions and modes of their operation $\underline{\varepsilon}(t)$ and the "age" t .

Let's consider the process of elements operation of the set of S RECS, taking into account the functioning of the support system in time. At the moment of t_1^{FAIL} failure of any of the RECS elements, it goes into a recovery state.

The failed element is either rejected or sent to RB, where it is restored, and a working element from the spare parts kit is installed in its place. The recovery ends at a random moment t_1^R , after which the RECS is operational until the next failure.

The density of the RECS recovery duration distribution is denoted by $f_R(t)$. During the RECS operation, random periods of uptime τ'_j and recovery time alternate τ''_j .

Such a process is called an alternating recovery process [5, 7]. Introduce $G_k(t)$ - time distribution function of the k -th transition from the recovery state to the working state. At this

$$G_k(t) = \int_0^t \Phi[(2k-1), \tau] f_R(t) dt, \quad (5)$$

where $\Phi[(2k-1), \tau]$ - there is a probability that the system, starting from the recovery state at $t = \tau_1'$ the moment of time, has returned to the same state by the moment of time, having made $2k-1$ transitions.

On the other hand, it is clear that

$$\Phi[(2k-1), \tau] = \int_0^t G_{k-1}(\tau-u) f_0(u) du. \quad (6)$$

Substituting expression (6) into (5), we obtain the distribution function $G_k(t)$:

$$G_k(t) = \int_0^t \left[\int_0^\tau G_{k-1}(\tau-u) f_R(u) du \right] f_0(t-\tau) d\tau. \quad (7)$$

$$\text{At this } G_1(t) = \int_0^t f_R(\tau) d\tau. \quad (8)$$

It is shown [7] that if there $F_k(t)$ is a time distribution function of the k -th transition from the working state to the recovery state in the alternating process, then the failure flow parameter is obtained from the ratio

$$\omega_0(t) = \frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^{\infty} F_k(t) \right). \quad (9)$$

Then, in the same alternating process, by analogy, we calculate the parameter of the recovery flow $\omega_R(t)$ by the formula

$$\omega_R(t) = \frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^{\infty} G_k(t) \right) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k(t). \quad (10)$$

Performing the forward and reverse Laplace transformation of the expression

$$G(t) = \sum_{k=1}^{\infty} G_k(t). \quad (11)$$

after the transformations, we find the ratio for the parameter of the recovery flow

$$\omega_R(t) = f_R(t) + \int_0^t \left[\int_0^\tau \omega_R(\tau-u) f_0(u) du \right] f_R(t-\tau) d\tau, \quad (12)$$

or, equivalently

$$\omega_R(t) = f_R(\tau) + \int_0^t \left(\int_0^{t-\tau} \omega_R(u) f_0(t-\tau-u) du \right) f_R(\tau) d\tau. \quad (13)$$

This relation for the given ones $f_0(t) f_R(t)$ is the Volterra integral equation of the second kind with a difference kernel relative to $\omega_R(t)$.

The main indicators of RECS reliability will be considered the system readiness coefficient (the probability that at any given time t the RECS will be in working condition - $K_r(t)$) and the operational readiness coefficient (the RECS will work flawlessly for a given time interval $(t, t+\tau)$, that is - $P(t, t+\tau)$), which are respectively equal to:

$$K_r(t) = P_1 + P_2 = p(t) + \int_0^t p(t-\tau) \omega_R(\tau) d\tau,$$

$$P(t, t+\tau) = p(t+\tau) + \int_0^t \omega_R(u) p(t+\tau-u) du, \quad (14)$$

where $p(t+\tau)$ is the probability that the RECS will not fail once during the time interval $(t+\tau)$, $\int_0^t \omega_R(u) P(t+\tau-u) du$ is the probability that the RECS will fail for the last time at some point in time $u(u < t)$, will be restored by time t and will not fail again until time $t+\tau$.

Thus, in order to calculate the main indicators of RECS reliability, it is necessary to know the law of system operation duration distribution before failure (or the corresponding density - $f_0(t)$) and the parameter of the recovery flow $\omega_B(t)$, found from the integral equation (13) through the recovery time distribution density $f_R(t)$.

On the other hand, to analyze the alternating recovery process, it is necessary to know the density of the uptime $f_0(t)$ and recovery time $f_R(t)$ distribution, while equation (13) can be used with this law of change $\omega_R(t)$ to find the recovery time distribution density $f_R(t)$.

An exact analytical solution of the Volterra equation of the second kind is possible only in some special cases.

Consider the options for obtaining a numerical solution of the Volterra equation.

Option 1. In this case, the traditional approach [8] is used, which consists in decomposing the core of the resolvent equation into a series. Let's evaluate its versatility.

Let's rewrite the expression of the Volterra equation (13) as follows

$$f_R(t) = \omega_R(t) + \lambda \int_0^t K(t, \tau) f(\tau) d\tau. \quad (15)$$

Here $\lambda = -1$, and

$$K(t, \tau) = \int_0^{t-\tau} \omega_R(u) f_0(t-\tau-u) du.$$

The kernel of the equation (resolvent) is represented as an expression

$$K(t, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} K_{n+1}(t, \tau),$$

where $K_n(t, \tau)$ – iterated kernels obeying the recurrence relation

$$\begin{aligned} K_1(t, \tau) &= K(t, \tau), \\ K_{n+1}(t, \tau) &= \\ &= \int_0^t K(t, \tau) K_n(t, \tau) d\tau, \quad n = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (16)$$

We will present the desired solution in the form of infinite series

$$\begin{aligned} f_R(t) &= f_0(t) + \lambda f_1(t) + \\ &+ \lambda^2 f_2(t) + \dots + \lambda^n f_n(t) + \dots \end{aligned} \quad (17)$$

After the transformations, we get

$$\begin{aligned} f_R(t) &= \omega_R(t) + \\ &+ \sum_{\gamma=1}^{\infty} \lambda^\gamma \int_0^t K_\gamma(t, \tau) \omega_R(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (18)$$

In order to evaluate the effectiveness of the described method of restoring an unknown law of the distribution of recovery time, a computational experiment was conducted. During the experiment, the reliability behavior of M homogeneous TEZ was simulated ($M=50$ was assumed).

Random recovery time durations were formed in accordance with the test distribution density $f_R(t)$. Rayleigh's law was chosen as a test distribution law. Random operating time to failure was assumed to be exponentially distributed.

Data on failures and subsequent recoveries were processed in order to calculate the law of change in the parameter of the recovery flow $\hat{\omega}(t)$.

The empirical function obtained in this case was $\hat{\omega}_R(t)$ further used to calculate the density of the recovery time distribution.

However, the functions obtained in this case $\hat{f}(t)$ are not distribution densities (they are not normalized and have negative values in the distribution area).

Therefore, an attempt was made to modernize the traditional methodology.

The resulting empirical function is $\hat{\omega}_R(t)$ pre-smoothed. To form a smoothed estimate of the $\hat{\omega}_{SMTH}(t)$ function, the $\hat{\omega}(t)$ cubic polynomial approximation using the least squares method was used. But the $\hat{\omega}_{SMTH}(t)$ functions obtained as a result of substitution into equation (12) and its solution are $f_{SMTH}(t)$ also not normalized and are negative in the distribution domain.

Thus, significant limitations of using the traditional method of obtaining a numerical solution of the Volterra equation of the second kind are revealed.

Option 2. Using parameterization technology. Due to the fact that the traditional approach of obtaining a solution to the Volterra equation of the second kind is not universal enough, a different approach is proposed. To find the density of the recovery time distribution, we use parameterization technology. In this case, we will look for the required density in some class of distributions.

The requirements for the analytical description of such a density consist in the possibility of changing its statistical characteristics in a wide range by varying the parameters.

In practice, [3, 5, 7, 10] several different approaches are used to obtain such descriptions, but the necessary requirements are met by the distribution density function, called the ϕ -distribution:

$$\begin{aligned} \phi(x) &= A \cdot \left[1 + \theta_4 \cdot (x - \theta_1)^2 / (2\theta_2^2) \right] \times \\ &\times \exp \left[-(x - \theta_1)^2 / (2\theta_2^2) \cdot (\rho + \theta_3 \cdot \text{sgn}(x - \theta_1)) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Here is:

- A – normalizing coefficient,
- θ_1 – parameter that characterizes mathematical expectation x ,
- θ_2 – parameter that characterizes variance x ,
- θ_3 – parameter that characterizes asymmetry x ,
- θ_4 – parameter that characterizes kurtosis x ,
- ρ – parameter that defines the possibilities of ϕ -distribution by asymmetry.

If $\theta_3 = 0, \theta_4 = 0$ and $\rho = 1$,

then $\phi(x)$ is a normal distribution. It follows from relation (19) that the values of the ϕ -distribution for any values of the parameters included in it are non-negative.

The multiplier A is found from the normalization condition:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) dx = 1. \quad (20)$$

At this

$$A \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left(\left[1 + \theta_4 \cdot (x - \theta_1)^2 / (2\theta_2^2) \right] \times \exp \left[-(x - \theta_1)^2 / (2\theta_2^2) \cdot (\rho + \theta_3 \cdot \text{sgn}(x - \theta_1)) \right] \right) dx = 1. \quad (21)$$

From here, after simple but cumbersome transformations, we get

$$A = \left\{ \theta_2 \sqrt{\pi} \times \left[\frac{1}{\sqrt{2(\rho + \theta_3)}} \left(1 + \frac{\theta_4}{2(\rho + \theta_3)} \right) + \frac{1}{\sqrt{2(\rho - \theta_3)}} \left(1 + \frac{\theta_4}{2(\rho - \theta_3)} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (22)$$

For unimodality $\phi(x)$, we require that it increases on the interval $[-\infty; m]$, i.e. $\frac{d\phi(x)}{dx} > 0$, if $x \in [-\infty; m]$, and decreases on the interval $[m; +\infty]$, i.e. $\frac{d\phi(x)}{dx} < 0$, if $x \in [m; +\infty]$, where $m = \theta_1$ is the mode of distribution x . Then after analyzing the expression of the first derivative we get

$$\left[1 + \theta_4 \cdot (x - \theta_1)^2 / (2\theta_2^2)\right] \cdot (\rho - |\theta_3|) > \theta_4. \quad (23)$$

Condition (23) should be satisfied for all $x \in (-\infty; +\infty)$; and since $\theta_4 > 0$ $u |\theta_3| < \rho$, in particular, and for $x = \theta_1$, which the multiplier $\left[1 + \theta_4 \frac{(x - \theta_1)^2}{2\theta_2^2}\right]$ takes the smallest value equal to 1. Hence the unimodality condition is follows:

$$\theta_4 + |\theta_3| < \rho. \quad (24)$$

We will investigate the possibility of using the ϕ -distribution to find the density of the recovery time distribution satisfying equation (12). Let's consider an optimization problem. For the given functions $\omega_B(t)$ and $f_0(t)$, describing the law of change of the recovery flow and the density of the distribution of the operating time to failure, it is necessary to find such a fixed set of parameters $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ defining the ϕ -distribution so as to minimize

$$J = \int_0^t \left[\frac{\omega_B(t) - \phi(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) - \int_0^{t-\tau} \int_0^{t-\tau-u} \omega_B(u) f_0(t-\tau-u) du}{\phi(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)} d\tau \right]^2 dt. \quad (25)$$

The objective functional (25) is the integral of the discrepancy square between the observed law of change of the recovery flow parameter and the one calculated in accordance with (13) description of this law corresponding to a fixed set of parameters $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$.

The resulting optimization problem was solved by the modified Nelder–Meade method. The Nelder–Mead method is a development of the simplex method of Spendl, Hext and Himsforth for finding the minimum of functions of n variables. In this case, a set of unknown parameters $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ determines the optimization procedure of the function $n=4$ variables. The essence of the method consists in comparing the values of the objective function J . $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ At the $(n+1)$ vertices of the simplex and moving the simplex in the direction of the optimal point using an iterative procedure.

The original simplex D_o is introduced so that the coordinates of the vertices are determined by the table (one of the vertices is at the origin):

$$D_0 = \begin{pmatrix} 0 & d_1 & d_2 & \dots & d_2 \\ 0 & d_2 & d_1 & \dots & d_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & d_2 & d_2 & \dots & d_1 \\ \underbrace{\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \dots \quad \theta_{n+1}}_{(n+1) \text{ dots}} \end{pmatrix},$$

$$d_1 = \frac{t}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} + n - 1), \quad d_2 = \frac{t}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} - 1),$$

t is some selected number.

At each iteration for the current simplex, the coordinates of the center of gravity of the figure resulting from the removal of the vertex are found \underline{g}_{n+1} :

$$\underline{c} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \underline{g}_j \quad (26)$$

Further, as is known, the simplex moves towards the optimum using three operations – reflection, stretching and compression, providing at each k th iteration $J_k(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) < J_{k-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$

The criterion for stopping a computational procedure has the form:

$$K = \delta \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} [J(\underline{g}_j) - J(\underline{c})]^2} + (1-\delta) \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} (\underline{g}_j - \underline{c})^T (\underline{g}_j - \underline{c})}, \quad \delta \in [0; 1]. \quad (27)$$

The stop criterion J is composite. At the same time, its components have different weights depending on the nature of behavior of the optimized function in the vicinity of the extremum. If the optimized function changes in the "deep depression" type in the region of the extremum, then the first term makes a greater contribution to the numerical value of the criterion K , and the second one decreases rapidly. On the contrary, if the optimized function changes in the "flat plateau" type, then the first term quickly becomes small and therefore the second term contributes more to the value of the criterion K .

To prevent premature triggering of the stop criterion near the optimum and neutralize the so-called "ravine effect" for the function $J_k(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ at the k th iteration, an improvement technique was used, the essence of which is as follows. After the stop criterion is triggered, a new simplex is constructed above the center of gravity of the compressed simplex, the dimensions of which correspond to the original simplex. Let the coordinates of the center of gravity of the compressed simplex form a vector $\underline{g} = \begin{pmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_n \end{pmatrix}$.

Is the coordinates of a point $\hat{A} = \begin{pmatrix} \hat{a}_1 \\ \vdots \\ \hat{a}_n \end{pmatrix}$ such that

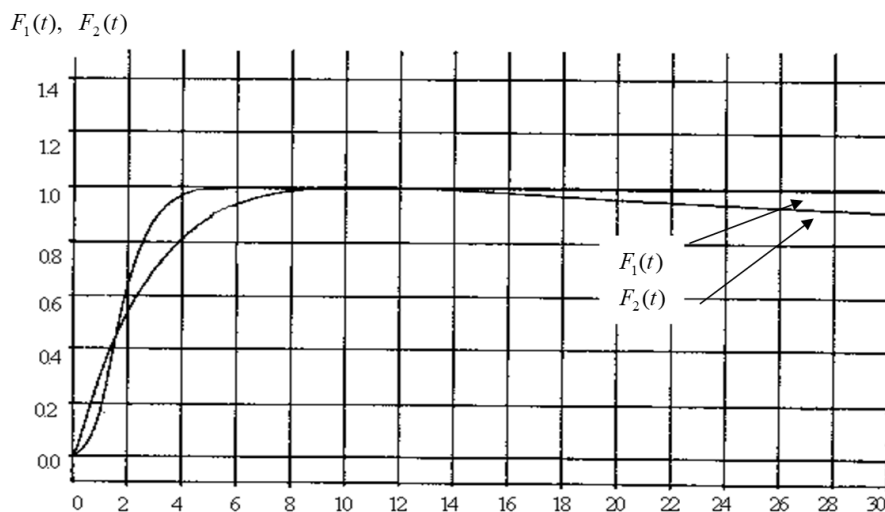


Fig. 2. Checking the Normalization of the Distribution Law

The ratio (31) is obtained under the assumption that the group set of SPTA-G is an inexhaustible source of replenishment.

In the absence of a replacement element in SPTA-G, the RECS restoration is carried out at the expense of the element returned from the repair body. Then the average recovery time of the RECS can be written as follows

$$T_R^{(j)} = T_{RO}^{(j)}(1 - P_O^{(j)}) + T_{AD}P_O^{(j)}(1 - P_G^{(j)}) + T_P^{(j)}P_O^{(j)}P_G^{(j)}, \quad (32)$$

where $P_G^{(j)}$ - the probability that at any given time there are no j -type elements in the SPTA-G kit, $T_P^{(j)}$ - the average repair time in the repair body of the j -type element.

In conclusion, we note that the calculated recovery time density is uniquely determined by the

nature of the data on the failure flow, however, the specifics of the structure and parameters of the spare parts system, heterogeneity, and multi-nomenclature of the source data are not fully taken into account [18, 19], which does not allow to consider the described methodology as a comprehensive method for analyzing the effectiveness of RECS groupings with unreliable elements in depending on the parameters and structure of SCSSSEP.

Consideration of these circumstances determines the direction of further research.

Conclusions

1. Mathematical model of the recovery process is proposed. A universal four-parameter distribution is used to describe random processes occurring in non-Markovian systems.

2. The resulting model makes it possible to determine the parameter of the recovery flow by solving the Volterra integral equation with a difference kernel.

REFERENCES

1. Borisov, Yu.P. and Cvetnov, V.V. (1985), *Matematicheskoe modelirovanie radiotekhnicheskikh sistem i ustroystv* [Mathematical modeling of radio engineering systems and devices], Radio i svyaz, Moscow, 176 p.
2. Vilkomir, S.A. (1988), "Ob odnom metode rascheta nadezhnosti strukturno-slozhnykh sistem s vosstanavlivaemymi elementami", *Nadezhnost i kontrol kachestva*, No. 2, pp.23-26.
3. Barzilovich, E.Yu., Belyaev, Yu.K. and Kashtanov, V.A. (1983), *Voprosi matematicheskoi teorii nadezhnosti* [Questions of the mathematical theory of reliability], Radio i svyaz, Moscow, 376 p.
4. Demchenko, O.F., Davidov, V.B., Isaev, L.A., Ivanchihin, Yu.V., Makarenko B.I. and Raskin, L.G. (2000), *Voprosi teorii ekspluatatsii avtomatizirovannykh transportnykh sistem upravleniya* [Questions of the theory of operation of automated transport control systems], HVU, Harkiv, 266 p.
5. Gnedenko, B.V., Belyaev, Yu.K. and Solovov, A.D. (1965), *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical Methods in Reliability Theory], Nauka, Moscow, 524 p.
6. Golovin, I.N., CHuvarigin, B.V. and SHura-Bura, A.E. (1984), *Raschet i optimizatsiya komplektov zapasnykh elementov radioelektronnih sistem* [Calculation and optimization of sets of spare elements of radio-electronic systems], Radio i svyaz, Moscow, 176 p.
7. Koks, D.R. and Smit, V.D. (1967), *Teoriya vosstanovleniya* [Recovery theory], Sov. Radio, Moscow, 299 p.
8. Nggada, S.H. (2012), "Software Failure Analysis at Architecture Level Using FMEA", *International Journal of Software*, No. 6, pp. 61-74.
9. Obana, M. and Hanakawa, N. (2016), "Process Evaluation Based on Meeting Quality of Requirement Analysis Phase in Software Development Project", *Journal of Software Engineering and Applications*, No. 7, pp. 828-843.
10. Ogheneovo, E.E. (2014), "Software Dysfunction: Why Do Software Fail?", *Journal of Computer and Communications*, No. 2, pp. 25-35.

11. Pizzi, N.J. and Pedrycz W. (2008), "Effective Classification Using Feature Selection and Fuzzy Integration", *Fuzzy Sets and Systems*, No. 21, pp. 2859-2872.
12. Pizzi, N.J. (2016), "Mapping Software Metrics to Module Complexity: A Pattern Classification Approach", *Journal of Software Engineering and Applications*, No. 4, pp. 426-432.
13. Raja, U., Hale, J. E. and Hale, D. P. (2015), "Temporal Patterns of Software Evolution Defects: A Comparative Analysis of Open Source and Closed Source Projects", *Journal of Software Engineering*, No. 2, pp. 113-121.
14. Ushakov, I.A. (1991), *Veroyatnostnie modeli nadezhnosti informacionno-vichislitel'nykh sistem [Probabilistic Models of Information and Computing Systems Reliability]*, Radio i svyaz, Moscow, 132 p.
15. Avizienis, A., Laprie, J.-C. and Randell B. (2001), "Fundamental Concepts of Dependability", *Research Report*, No 1145, LAAS-CNRS, April,
16. Meeker, W.Q. and Escobar, L.A. (2016), *Statistical Methods for Reliability Data*, J.Wiley and Sons, New York, 704 p.
17. Bagdonavicius, V.B. and Nikulin, M.S. (2009), *Accelerated Life Models: Modeling and Statistical Analysis*, Chapman&Hall/CRC, Boca Raton, 360 p.
18. Antonov, A.V. and Nikulin, M.S. (2012), *Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti [Statistical models in reliability theory]*, Abris, Moscow, 392 p.
19. Raskin, L.G. and Pustovoitov, P.E. (2002), "Reshenie mnogonomenklaturnykh zadach upravleniya zapasami po veroyatnostnomu kriteriyu [Solving multi-item problems of inventory management by a probabilistic criterion]", *Vestnik NTU HPI*, pp.49-53.

Received (Надійшла) 10.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Раскін Лев Григорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтернету речей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Lev Raskin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Internet of Things Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: topology@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

Іванчихін Юрій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інтернету речей, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна;

Yuriy Ivanchikhin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Internet of Things Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: iwanywed@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3999-6541>.

Сухомлин Лариса Вадимівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна;

Larysa Sukhomlyn – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management, Kremenchuk Mikhail Ostrogradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine;

e-mail: lar.sukhomlyn@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9511-5932>.

Святкін Ярослав Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інтернету речей, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна;

Iaroslav Sviatkin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Internet of Things Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: yariks@i.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6828-6699>.

Корсун Роман Олегович – аспірант кафедри інтернету речей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Roman Korsun – postgraduate student of the Internet of Things Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: roman.korsun7@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1950-4263>.

Модель оцінки процесів відновлення немарківських систем з урахуванням ненадійності елементів за довільних законів розподілу

Л. Г. Раскін, Ю. В. Иванчихін, Л. В. Сухомлин, Я. В. Святкін, Р. О. Корсун

Анотація. Предмет дослідження – надійність немарківських систем, що відновлюються, функціонування яких описується довільними законами розподілу. **Метою статті** є розробка математичної моделі функціонування сучасних комп'ютерних систем за довільними законами розподілу тривалості перебування в кожному із станів з урахуванням відновлення системи та забезпеченості запасними елементами. **Основним завданням** є розробка адекватної моделі процесу функціонування системи з урахуванням немарковського характеру процесів, що відбуваються в системі, її можливої великої розмірності та наявності ієрархічної системи відновлення. На основі цієї моделі розроблено метод розрахунку щільності розподілу часу відновлення системи. Водночас запропоновано універсальний чотирипараметричний розподіл для опису випадкових процесів, що відбуваються в системі. Використовуючи цю апроксимацію, розрахунок шуканого параметру потоку відновлення виконується шляхом розв'язання інтегрального рівняння Вольтерра з різницею ядром.

Ключові слова: відновлення немарківських систем; математична модель надійності; щільність розподілу часу відновлення.

Methods of information systems synthesis

UDC 621.3

DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.05>Eugene Aleksandrov¹, Tetiana Aleksandrova², Iryna Kostianyk², Yaroslav Morgun²¹ Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine² National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

PARAMETRIC SYNTHESIS OF AN ELECTRO-HYDRAULIC EXECUTIVE DEVICE OF A DIGITAL SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF A MOVING OBJECT

Abstract. Most modern moving objects, including military moving objects, are equipped with guidance and stabilization systems with electro-hydraulic executive devices. Intercontinental ballistic missiles, space vehicles, aircraft, the main armament of tanks and ships have high-precision digital guidance and stabilization systems with electro-hydraulic actuators with potentiometric feedback, capable of ensuring high accuracy of stabilization of a moving object in a given direction. The work is devoted to the development of a methodology for selecting the value of the feedback channel amplification coefficient, which provides the maximum margin of stability and the maximum speed of the closed digital system of guidance and stabilization of a moving object. The proposed technique is based on the application of a discrete-continuous mathematical model of a closed digital system of guidance and stabilization of a moving object, which contains ordinary differential equations for describing the disturbed motion of the continuous part of the stabilized object, as well as difference equations for describing a discrete stabilizer. To construct the characteristic equation of a closed discrete system, the mathematical model is reduced to a system of difference equations using matrix series. At the same time, the number of considered members of the matrix series depends on the value of the quantization period of the digital stabilizer, therefore, in addition to determining the amplification coefficient of the feedback channel of the executive device, the proposed technique also includes the determination of the value of the quantization period of the digital stabilizer.

Keywords: guidance and stabilization system of a moving object; electrohydraulic executive device; quantization period of the digital stabilizer; margin of stability and speed of the closed-loop system.

Introduction

Problem statement. Electro-hydraulic actuators or electro-hydraulic amplifiers (EHA) are widely used in automatic control systems for moving objects and, above all, for military purposes objects. Guidance and stabilization systems for aircraft, missiles, spacecraft, ship and tank guns usually contain EHA, which make it possible to provide the required stability margin, high speed and accuracy of guidance and stabilization of these objects. The creation of high-precision systems of armaments and military equipment has led to the mass transition of automatic control systems for military facilities to a digital construction principle, which makes it possible to implement complex non-linear and non-stationary control algorithms that ensure high quality indicators of these types of armaments. The purpose of this work is to select the variable parameters of a digitally controlled EHA that provide high accuracy in processing control signals generated by an on-board digital computer (OBCM).

Main material

Mathematical model of the perturbed motion of the EHA. As an example, let us consider a schematic diagram of an EHA of a ballistic missile guidance and stabilization system that ensures turn of the combustion chamber of a liquid-propellant jet engine (LRE) [1, 2], shown in Fig. 1. The inputs of the onboard computer 1 receive signals from the outputs of the inertial sensors of angles, angular velocities and accelerometers that measure linear accelerations relative to the main central axes of inertia of the rocket, as well as signals from the outputs of the feedback potentiometers 14. The analog-

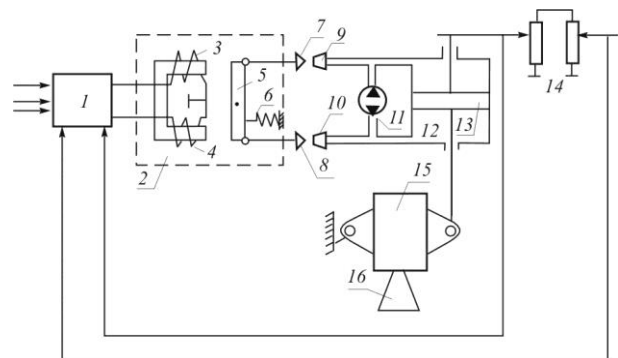


Fig. 1. Schematic diagram of an EHA of a ballistic missile guidance and stabilization system

to-code converter converts the onboard computer input signals into lattice functions, on the basis of which the guidance and stabilization algorithm is formed in the form of a lattice function $u_{\Sigma}[nT]$, which is converted by the code-to-analog converter into a continuous voltage function $u_{\Sigma}(t)$ supplied to the electromagnet input 2 which contain control windings 3 and 4, rocker arm 5 and fixing spring 6 holding rocker arm 5 in the neutral position at zero signals to windings 3 and 4. If the lattice function $u_{\Sigma}[nT]$ is positive, then a positive signal $u_{\Sigma}(t)$ goes to winding 3, and if the function $u_{\Sigma}[nT]$ is negative, then a positive signal $u_{\Sigma}(t)$ goes to winding 4. In the first In this case, the rocker arm 5 rotates by a positive angle $\beta(t)$ (counterclockwise), and in the second case, by a negative angle $\beta(t)$

(clockwise). The instantaneous value of the current in any of the control windings 3 or 4 is determined by solving the differential equation

$$L_y \frac{di(t)}{dt} + r_y i(t) = u_\Sigma(t), \quad (1)$$

where L_y is the inductance of the control winding; r_y – active resistance of the control winding; $u_\Sigma(t)$ is the signal at the output of the code-analogue converter corresponding to the lattice function

$$u_\Sigma[nT] = G[nT] - k_\delta \delta[nT], \quad (2)$$

where $G[nT]$ is the lattice function that determines the stabilization algorithm; $k_\delta \delta[nT]$ – lattice function of the feedback EHA by the angle of turn of the LRE combustion chamber.

When the rocker arm 5 is rotated by a positive angle $\beta(t)$, the needle 7 slightly opens the calibrated hole 9, and the needle 8 covers the calibrated hole 10. The pressure created by the hydraulic pump 11 decreases in the upper cavity of the hydraulic power cylinder 12, and increases in the lower cavity, causing the piston 13 to move up. The turn of the rocker arm 5 is described by the differential equation

$$I_k \frac{d^2\beta(t)}{dt^2} + f \frac{d\beta(t)}{dt} + c\beta(t) = k_\beta i(t), \quad (3)$$

and the displacement of the piston of the power hydraulic cylinder $s(t)$ is associated with the turn of the rocker arm 5 through the angle $\beta(t)$ by the dependence

$$\frac{ds(t)}{dt} = k_p \beta(t), \quad (4)$$

here I_k is the moment of inertia of the rocker arm; f is the coefficient of fluid friction along the axis of the rocker arm; c – stiffness coefficient.

And finally, the angle of turn of the LRE combustion chamber $\delta(t)$ is related to the moving of the piston $s(t)$ by the formula

$$\delta(t) = k_s s(t). \quad (5)$$

From relations (4) and (5) we have

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = k_p k_s \beta(t). \quad (6)$$

We write differential equations (1) and (3) in the form

$$T_y \frac{di(t)}{dt} + i(t) = k_y u_\Sigma(t); \quad (7)$$

$$T_1^2 \frac{d^2\beta(t)}{dt^2} + T_2 \frac{d\beta(t)}{dt} + \beta(t) = \frac{k_\beta}{c} i(t). \quad (8)$$

where the following notation is accepted

$$T_y = \frac{L_y}{r_y}; \quad k_y = \frac{1}{r_y}; \quad T_1^2 = \frac{I_k}{c}; \quad T_2 = \frac{f}{c}.$$

Differential equations (6)–(8) together represent a mathematical model of the continuous part of the EHA. The mathematical model of the discrete part of the EHA can be obtained from relation (2), if we put $G[nT] = 0$ in the latter. As a result, we have

$$u_\Sigma[nT] = -k_\delta \delta[nT]. \quad (9)$$

We write the mathematical models of the continuous and discrete parts of the EHA in normal form, for which we introduce the state vector of the EHA

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t) \\ \beta(t) \\ \dot{\beta}(t) \\ \delta(t) \end{bmatrix}; \quad U(t) = u_\Sigma(t).$$

As a result, we have

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= -\frac{1}{T_y} x_1(t) + \frac{k_y}{T_y} u_\Sigma(t); \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= x_3(t); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = -\frac{1}{T_1^2} x_2(t) - \frac{T_2}{T_1^2} x_3(t) + \frac{k_\beta}{c T_1^2} x_1(t);$$

$$\frac{dx_4(t)}{dt} = k_p k_s x_2(t).$$

We write system (10) in the vector-matrix form

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t), \quad (11)$$

where the matrices A and B are written as

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_\beta}{c T_1^2} & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} & 0 \\ 0 & k_p k_s & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{k_y}{T_y} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Let us write a difference equation connecting the initial state of the continuous part of the system $X[kT]$ with its final state $X[(k+1)T]$ at each discreteness period [3]

$$X[(k+1)T] = \Phi \cdot X[kT] + H \cdot U[kT], \quad (12)$$

where the matrices Φ and H are determined by the formulas:

$$\Phi = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} A^i T^i; \quad (13)$$

$$H = \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(i+1)!} A^i T^{i+1} \right] B. \quad (14)$$

The number of terms of the matrix series (13) and (14) taken into account depends on the value of the discreteness period T . Usually, when using modern onboard computers with a small quantization period, it is assumed with sufficient accuracy

$$\Phi = E + A \cdot T; \quad (15)$$

$$H = B \cdot T. \quad (16)$$

We write relation (9) in the vector-matrix form

$$U[kT] = K \cdot X[kT], \quad (17)$$

where the Kravna matrix is equal to

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ k_{\delta}]. \quad (18)$$

Let us substitute relation (17) into difference equation (12). As a result, we obtain the difference EHA equation with digital feedback

$$X[(k+1)T] = [\Phi + H \cdot K] \cdot X[kT]. \quad (19)$$

Let us write the characteristic equation of the EHA [3]

$$\det[\Phi + H \cdot K - E \cdot z] = 0. \quad (20)$$

Substituting matrices (15), (16), and (18) into equation (20), we obtain

$$\det \begin{bmatrix} (1-z) - \frac{T}{T_y} & 0 & 0 & -k_y k_{\delta} \frac{T}{T_y} \\ 0 & 1-z & T & 0 \\ \frac{k_{\beta} T}{c T_1^2} & -\frac{T}{T_1^2} & (1-z) - \frac{T_2 T}{T_1^2} & 0 \\ 0 & k_p k_s & 0 & 1-z \end{bmatrix} = 0. \quad (21)$$

Expanding the determinant (21), we write the characteristic equation of the EHA with digital feedback in the form

$$(1-z)^4 - (1-z)^3 \left(\frac{T_2}{T_1^2} + \frac{1}{T_y} \right) T + (1-z)^2 \times \\ \times \left(1 + \frac{T_2}{T_y} \right) \frac{T^2}{T_1^2} - (1-z) \frac{T^3}{T_y T_1^2} + k \cdot k_{\delta} \frac{T^4}{T_y T_1^2} = 0, \quad (22)$$

where the gain of the direct circuit of the EHA is equal to

$$k = \frac{k_y k_{\beta} k_p k_s}{c}. \quad (23)$$

Parametric synthesis of EHA with digital feedback. Let us use the w -transformation method [4] and set in the characteristic equation (22)

$$z = \frac{1+w}{1-w}.$$

Then

$$1-z = -\frac{2w}{1-w}; \quad (1-z)^2 = \frac{4w^2}{1-2w+w^2};$$

$$(1-z)^3 = -\frac{8w^3}{1-3w+3w^2-w^3}; \quad (24)$$

$$(1-z)^4 = \frac{16w^4}{1-4w+6w^2-4w^3+w^4}.$$

In the obtained relations (21), we will make the replacement [5] $w = \alpha + j\omega$. As a result, we get

$$1-z = \alpha_1(\alpha, \omega) + j\beta_1(\alpha, \omega); \quad (25)$$

$$(1-z)^2 = \alpha_2(\alpha, \omega) + j\beta_2(\alpha, \omega);$$

$$(1-z)^3 = \alpha_3(\alpha, \omega) + j\beta_3(\alpha, \omega);$$

$$(1-z)^4 = \alpha_4(\alpha, \omega) + j\beta_4(\alpha, \omega),$$

where
$$\alpha_1(\alpha, \omega) = -\frac{2[\alpha(1-\alpha) - \omega^2]}{(1-\alpha)^2 + \omega^2}; \quad (26)$$

$$\beta_1(\alpha, \omega) = -\frac{2\omega}{(1-\alpha)^2 + \omega^2}; \quad (27)$$

$$\alpha_2(\alpha, \omega) = \frac{4 \left[(\alpha^2 - \omega^2)(1 - 2\alpha + \alpha^2 - \omega^2) - 4\alpha\omega^2(1-\alpha) \right]}{(1 - 2\alpha + \alpha^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2(1-\alpha)^2}; \quad (28)$$

$$\beta_2(\alpha, \omega) = \frac{4 \left[2\omega(1-\alpha)(\alpha^2 - \omega^2) + 2\alpha\omega(1 - 2\alpha + \alpha^2 - \omega^2) \right]}{(1 - 2\alpha + \alpha^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2(1-\alpha)^2}; \quad (29)$$

$$\alpha_3(\alpha, \omega) =$$

$$\left\{ \begin{aligned} & (\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) \times \\ & 8 \times \left[1 - 3\alpha + 3(\alpha^2 - \omega^2) - (\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) \right] + \\ & + \omega^2(-3 + 6\alpha - 3\alpha^2 + \omega^2)(3\alpha^2 - \omega^2) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$= -\frac{\left[1 - 3\alpha + 3(\alpha^2 - \omega^2) - (\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) \right]^2 + \omega^2(-3 + 6\alpha - 3\alpha^2 + \omega^2)^2}{\left[1 - 3\alpha + 3(\alpha^2 - \omega^2) - (\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) \right]^2 + \omega^2(-3 + 6\alpha - 3\alpha^2 + \omega^2)^2};$$

$$\beta_3(\alpha, \omega) =$$

$$8 \left\{ \begin{aligned} & -(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2)\omega(-3 + 6\alpha - 3\alpha^2 + \omega^2) + \\ & + (3\alpha^2\omega - \omega^3) \times \\ & \times \left[1 - 3\alpha + 3(\alpha^2 - \omega^2) - (\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) \right] \end{aligned} \right\}; \quad (31)$$

$$= -\frac{\left[1 - 3\alpha + 3(\alpha^2 - \omega^2) - (\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) \right]^2 + \omega^2(-3 + 6\alpha - 3\alpha^2 + \omega^2)^2}{\left[1 - 3\alpha + 3(\alpha^2 - \omega^2) - (\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) \right]^2 + \omega^2(-3 + 6\alpha - 3\alpha^2 + \omega^2)^2}$$

$$\alpha_4(\alpha, \omega) =$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned} & (\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) \times \\ & \left[1 - 4\alpha + 6(\alpha^2 - \omega^2) - \right. \\ & \left. - 4(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + \right. \\ & \left. + (\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) \right] + \\ & + 4\alpha\omega^2(\alpha^2 - \omega^2) \times \\ & \left[-4 + 12\alpha - 4(3\alpha^2 - \omega^2) + \right. \\ & \left. + 4\alpha(\alpha^2 - \omega^2) \right] \end{aligned} \right\} + \\
 & = \frac{\left[1 - 4\alpha + 6(\alpha^2 - \omega^2) - 4(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + \right. \\ & \left. + (\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) \right]^2 + \\ & + \omega^2 \left[-4 + 12\alpha - 4(3\alpha^2 - \omega^2) + \right. \\ & \left. + 4\alpha(\alpha^2 - \omega^2) \right]^2}{\left[1 - 4\alpha + 6(\alpha^2 - \omega^2) - 4(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + \right. \\ & \left. + (\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) \right]^2 + \\ & + \omega^2 \left[-4 + 12\alpha - 4(3\alpha^2 - \omega^2) + \right. \\ & \left. + 4\alpha(\alpha^2 - \omega^2) \right]^2}; \quad (32) \\
 & \beta_4(\alpha, \omega) = \\
 & \left\{ \begin{aligned} & 4\alpha\omega(\alpha^2 - \omega^2) \times \\ & \left[1 - 4\alpha + 6(\alpha^2 - \omega^2) - \right. \\ & \left. - 4(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + \right. \\ & \left. + (\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) \right] - \\ & - (\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) 4\omega \times \\ & \left[-1 + 3\alpha - (3\alpha^2 - \omega^2) + \right. \\ & \left. + \alpha(\alpha^2 - \omega^2) \right] \end{aligned} \right\} \\
 & = \frac{\left[1 - 4\alpha + 6(\alpha^2 - \omega^2) - 4(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + \right. \\ & \left. + (\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) \right]^2 + \\ & + \omega^2 \left[-4 + 12\alpha - 4(3\alpha^2 - \omega^2) + \right. \\ & \left. + 4\alpha(\alpha^2 - \omega^2) \right]^2}; \quad (33)
 \end{aligned}$$

Taking into account relations (25), the characteristic equation of the EHA with digital feedback (22) takes the following form

$$\begin{aligned}
 & \alpha_4(\alpha, \omega) + j\beta_4(\alpha, \omega) - \\
 & - \left(T_2/T_1^2 + 1/T_y \right) T \left[\alpha_3(\alpha, \omega) + j\beta_3(\alpha, \omega) \right] + \\
 & + \left(1 + \frac{T_2}{T_y} \right) \frac{T^2}{T_1^2} \left[\alpha_2(\alpha, \omega) + j\beta_2(\alpha, \omega) \right] - \\
 & - \frac{T^3}{T_y T_1^2} \left[\alpha_1(\alpha, \omega) + j\beta_1(\alpha, \omega) \right] + k \cdot k_\delta \frac{T^4}{T_y T_1^2} = 0. \quad (34)
 \end{aligned}$$

We represent the value k_δ as the sum of the real and imaginary parts

$$k_\delta = \text{Re } k_\delta + j \text{Im } k_\delta.$$

Then from equation (34) we have

$$\begin{aligned}
 \text{Re } k_\delta &= \frac{T_y T_1^2}{k T^4} \left\{ \begin{aligned} & -\alpha_4(\alpha, \omega) + \\ & + \left(\frac{T_2}{T_1^2} + \frac{1}{T_y} \right) T \alpha_3(\alpha, \omega) - \\ & - \left(1 + \frac{T_2}{T_y} \right) \frac{T^2}{T_1^2} \alpha_2(\alpha, \omega) + \\ & + \frac{T^3}{T_y T_1^2} \alpha_1(\alpha, \omega) \end{aligned} \right\}; \quad (35) \\
 \text{Im } k_\delta &= \frac{T_y T_1^2}{k T^4} \left\{ \begin{aligned} & -\beta_4(\alpha, \omega) + \\ & + \left(\frac{T_2}{T_1^2} + \frac{1}{T_y} \right) T \beta_3(\alpha, \omega) - \\ & - \left(1 + \frac{T_2}{T_y} \right) \frac{T^2}{T_1^2} \beta_2(\alpha, \omega) + \\ & + \frac{T^3}{T_y T_1^2} \beta_1(\alpha, \omega) \end{aligned} \right\}. \quad (36)
 \end{aligned}$$

Using formulas (35), (36), taking into account relations (26)–(33) in the complex plane ($\text{Re } k_\delta, \text{Im } k_\delta$) we construct the boundary of the EHA stability region, assuming $\alpha = 0$ and changing ω from zero to infinity. The straight line segment enclosed between the intersection points of the constructed curve and the real axis will determine the stability region of the EHA with digital feedback (Fig. 2).

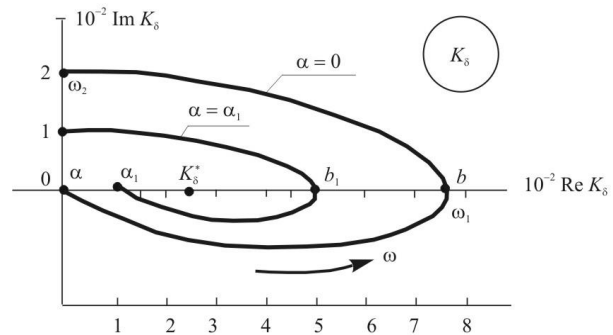


Fig. 2. The boundary of the region of stability and the line of equal degree of stability in the plane of the complex parameter k_δ

By changing the value of α in the negative direction $\alpha > \alpha_1$ and constructing lines of an equal degree of stability [5], on the real axis of the complex plane we will select segments $a_1 b_1$, contracting at some $\alpha = \alpha^*$ to the point $k_\delta = k_\delta^*$, in which the stability margin EHA is maximum and equal to $\alpha = \alpha^*$.

The point k_{δ}^* , which ensures the maximum stability margin of the EHA, is located on the real axis of the complex plane K_{δ} . The segment $a_1 b_1$ contracts to this point. Point a_1 corresponds to $\omega=0$ for each of the lines of equal degree of stability, consequently, the coordinate of point a_1 on the real axis of the complex plane K_{δ} is determined by the dependence

$$a_1(\alpha) = \frac{T_y T_1^2}{k T^4} \left\{ \begin{array}{l} -\alpha_4(\alpha, 0) + \left(\frac{T_2}{T_1^2} + \frac{1}{T_y} \right) \times \\ \times T \alpha_3(\alpha, 0) - \left(1 + \frac{T_2}{T_y} \right) \frac{T^2}{T_1^2} \times \\ \times \alpha_2(\alpha, 0) + \frac{T^3}{T_y T_1^2} \alpha_1(\alpha, 0) \end{array} \right\}, \quad (37)$$

where the quantities $\alpha_i(\alpha, 0)$ can be obtained from relations (26), (28), (30) and (32) when substituting $\omega=0$ in them:

$$\begin{aligned} \alpha_1(\alpha, 0) &= -\frac{2\alpha}{1-\alpha}; & \alpha_2(\alpha, 0) &= \frac{4\alpha^2}{(1-\alpha)^2}; \\ \alpha_3(\alpha, 0) &= -\frac{8\alpha^3}{(1-\alpha)^3}; & \alpha_4(\alpha, 0) &= \frac{16\alpha^4}{(1-\alpha)^4}. \end{aligned} \quad (38)$$

At the point k_{δ}^* , the value of $a_1(\alpha)$ reaches its maximum

$$k_{\delta}^* = \max_{\alpha} a_1(\alpha). \quad (39)$$

We differentiate the right side of dependence (38) with respect to α and equate the result of differentiation to zero

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial \alpha_4(\alpha, 0)}{\partial \alpha} + \left(\frac{T_2}{T_1^2} + \frac{1}{T_y} \right) T \frac{\partial \alpha_3(\alpha, 0)}{\partial \alpha} - \\ & - \left(1 + \frac{T_2}{T_y} \right) \frac{T^2}{T_1^2} \frac{\partial \alpha_2(\alpha, 0)}{\partial \alpha} + \frac{T^3}{T_y T_1^2} \frac{\partial \alpha_1(\alpha, 0)}{\partial \alpha} = 0. \end{aligned} \quad (40)$$

As an example, consider an EHA with parameters $k = 0,3664 \text{ V}^{-1}$; $T_y = 4 \cdot 10^{-2} \text{ s}$; $T_1^2 = 10^{-4} \text{ s}^2$; $T_2 = 0,55 \cdot 10^{-2} \text{ s}$. Then, taking into account relations (39), condition (40) takes the form:

$$\begin{aligned} & \alpha^3 \left[-32 + 9,6 \cdot 10^2 T - 4,548 \cdot 10^4 T^2 + 0,25 \cdot 10^6 T^3 \right] + \\ & + \alpha^2 \left[-9,6 \cdot 10^2 T + 9,1 \cdot 10^4 T^2 - 0,75 \cdot 10^6 T^3 \right] + \\ & + \alpha \left[-4,548 \cdot 10^4 T^2 + 0,75 \cdot 10^6 T^3 \right] - 0,25 \cdot 10^6 T^3 = 0. \end{aligned} \quad (41)$$

The real negative and two complex-conjugate roots with negative real parts of the cubic equation (41) determine the value of the maximum stability margin α^* of the considered EHA.

EHA with digital feedback has two variable

parameters – the gain of the feedback loop k_{δ} and the quantization period of the onboard computer T . The optimal value of k_{δ}^* in accordance with relations (37) and (39) is determined by the formula

$$k_{\delta}^* = \frac{T_y T_1^2}{k T^4} \left\{ \begin{array}{l} -\alpha_4(\alpha^*, 0) + \left(\frac{T_2}{T_1^2} + \frac{1}{T_y} \right) T \alpha_3(\alpha^*, 0) - \\ - \left(1 + \frac{T_2}{T_y} \right) \frac{T^2}{T_1^2} \alpha_2(\alpha^*, 0) + \frac{T^3}{T_y T_1^2} \alpha_1(\alpha^*, 0) \end{array} \right\}. \quad (42)$$

On Fig. 3 shows the root locus of the third-order polynomial (41) depending on the quantization period of the onboard computer. Points 1–6 of the root locus correspond to the following values of the quantization period T :

- 1 – $T = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$; 2 – $T = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$; 3 – $T = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$;
- 4 – $T = 6 \cdot 10^{-3} \text{ s}$; 5 – $T = 8 \cdot 10^{-3} \text{ s}$; 6 – $T = 10^{-2} \text{ s}$.

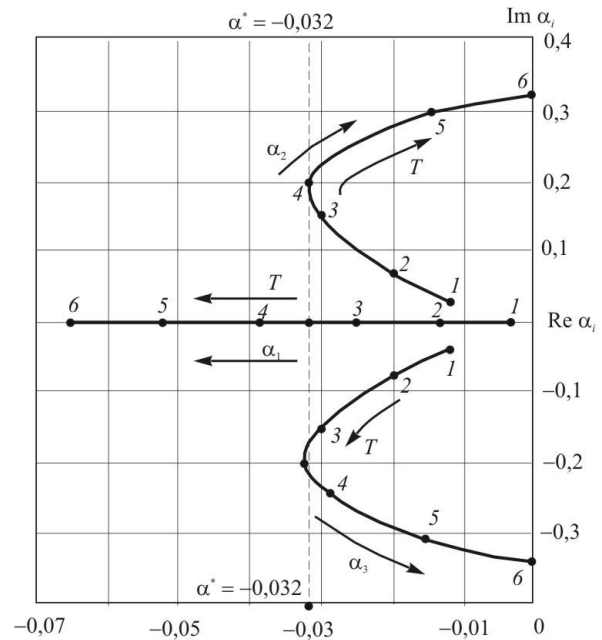


Fig. 3. Root locus of the polynomial of the third order (41)

A closed-loop EHA achieves a maximum margin of stability and speed in the case when the real parts of all three roots of the polynomial (41) are the same, and the roots themselves are located on a vertical dash-dotted line. In this case, the value $\alpha^* = -0,032$, which corresponds to the value of the on-board computer quantization period $T = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. With a further increase in T , the stability margin and speed of the EHA decrease, and at $T = 10^{-2} \text{ s}$, the EHA loses stability.

Let us substitute $\alpha^* = -0,032$ into relations (38)

$$\begin{aligned} \alpha_1(\alpha^*, 0) &= 0,062; & \alpha_2(\alpha^*, 0) &= 0,00376; \\ \alpha_3(\alpha^*, 0) &= 0,000233; & \alpha_4(\alpha^*, 0) &= 0,000141. \end{aligned}$$

Then from relation (42) we find the optimal values of the coefficient of gain of the EHA feedback $k_{\delta}^* = 0,3664 \text{ V}$.

Conclusions

The variable parameters of the EHA with digital feedback are the feedback gain k_{δ} and the quantization

period of the onboard computer T . It is recommended to choose the values of both variable parameters from the condition of ensuring the maximum margin of stability and speed of the closed-loop EHA.

REFERENCES

1. Igdalov, I.M., Kuchma, L.D., Polyakov, N.V. and Sheptun, Yu.D. (2010), *Dinamicheskoe proektirovanie raket* [Dynamic design of the rockets], DNU, Dnepropetrovsk, 264 p. (in Russian).
2. Aleksandrov, Ye.Ye., Kozlov, Ye.P. and Kuznyeczov, B.I. (2006), *Avtomatychne keruvannya ruhomymy obyektamy i tehnologichnymy procesamy. T. 2. Avtomatychne keruvannya rukhom litalnykh aparativ* [Automatic control of moving objects and technological processes. Vol. 2. Automatic control of aircraft movement], NTU «KhPI», Kharkiv, 528 p. (in Ukrainian).
3. Vasilev, S.K., Zaharov, V.N. and Prohorov, Yu.F. (1979), *Kibernetika v sistemah voennogo naznacheniya* [Cybernetics in military systems], Voenizdat, Moscow, 263 p. (in Russian).
4. Aleksandrov, Ye.Ye. and Aleksandrova, T.Ye. (2014), *Matematicheskoe modelirovanie, sistemnyy analiz i sintez dinamicheskikh sistem* [Mathematical modeling, systems analysis and synthesis of dynamic systems], NTU «KhPI», Kharkiv, 200 p. (in Russian).
5. Orurk I. A. (1965). *Novyye metody sinteza lineynykh i nekotorykh nelineynykh dinamicheskikh sistem* [New methods for the synthesis of linear and some nonlinear dynamical systems], Nauka, Moskov –Leningrad, 207 p. (in Russian).
6. Besekerskiy, V.A. and Popov, Ye.P. (2003), *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems], Professia, St.Petersburg, 575 p. (in Russian).

Надійшла (received) 19.05.2022

Прийнята до друку (accepted for publication) 15.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Александров Євген Євгенович – доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;

Eugene Aleksandrov – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of automobiles, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: aleksandrov.ye.ye@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7525-6383>

Александрова Тетяна Євгенівна – доктор технічних наук, професор кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Tetiana Aleksandrova – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: aleksandrova.t.ye@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9596-0669>

Костяник Ірина Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин імені О. О. Морозова, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Iryna Kostianyk – PhD, Associate Professor Department of Information Technologies and Systems of Wheel and Track Machines named after Morozov, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: kostyanik-irina@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0289-2869>

Моргун Ярослав Юрійович – аспірант кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Yaroslav Morgun – graduate student Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: yarki95@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7399-4937>

Параметричний синтез електрогідравлічного виконавчого органу цифрової системи автоматичного керування рухомих об'єктом

Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова, І. В. Костяник, Я. Ю. Моргун

Анотація. Більшість сучасних рухомих об'єктів, зокрема рухомих об'єктів військового призначення, оснащені системами наведення і стабілізації з електрогідравлічними виконавчими органами. Міжконтинентальні балістичні ракети, космічні апарати, літаки, основне озброєння танків і кораблів мають високоточні цифрові системи наведення і стабілізації з електрогідравлічними виконавчими елементами з потенціометричним зворотним зв'язком, здатними забезпечити високу точність стабілізації рухомого об'єкта щодо заданого напрямку. Робота присвячена розробці методики вибору значення коефіцієнта підсилення каналу зворотного зв'язку, що забезпечує максимальний запас стійкості і максимальну швидкодію замкненої цифрової системи наведення і стабілізації рухомого об'єкта. Запропонована методика базується на застосуванні дискретно-континуальної математичної моделі замкненої цифрової системи наведення і стабілізації рухомого об'єкта, що містить звичайні диференціальні рівняння для опису збуреного руху континуальної частини об'єкта, що стабілізується, а також різницеві рівняння для опису дискретного стабілізатора. Для побудови характеристичного рівняння замкненої дискретної системи математична модель приводиться до системи різницевих рівнянь із застосуванням матричних рядів. При цьому кількість врахованих членів матричних рядів залежить від величини періоду квантування цифрового стабілізатора, отже окрім визначення коефіцієнта підсилення каналу зворотного зв'язку виконавчого органу запропонована методика включає також визначення величини періоду квантування цифрового стабілізатора.

Ключові слова: система наведення і стабілізації рухомого об'єкта; електрогідравлічний виконавчий орган; період квантування цифрового стабілізатора; запас стійкості і швидкодія замкненої системи.

Elvin Yusubov, Lala Bekirova

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

DEVELOPMENT OF AN IMPROVED HIERARCHICAL CONTROL SYSTEM USING THE METAHEURISTIC PID TUNER FOR DC MICROGRIDS

Abstract. This paper presents the development of the improved hierarchical control system using the metaheuristic centralized PID tuner for DC microgrids. Hierarchical control is one of the best control strategies employed in photovoltaics (PV) based DC microgrids with three layers of primary, secondary, and tertiary controllers in which PID control is at the center of each one of these three layered control levels. The principal objective of the primary controller is to ensure near-equal power sharing among the units and of the secondary controller is to correct the deviations in the common DC link, while the tertiary controller is used to manage the energy flow among DC microgrids or between DC microgrid and the main utility grid. Partial shading, the uncertain nature of solar irradiation, and varying temperatures significantly reduce the overall power efficiency of traditionally tuned PID control-based hierarchical systems, since the tuning gains of these PID controllers are not adaptive to the dynamic processes. To optimize the control process, a novel hierarchical system is considered in which PID gains of primary, secondary, and tertiary controllers are tuned with metaheuristic moth-flame optimization to adapt to the variations. Matlab/Simulink simulations are performed to verify the efficiency of the proposed approach. The results highlight the superiority of the proposed method by utilizing process adaptive gains.

Keywords: Hierarchical control system; DC-DC converters; DC microgrid, Metaheuristic; Moth flame optimization.

Introduction

A growing interest in DC microgrids, which is an electrical network integrating various distributed energy sources, has led to the development of more energy-efficient and reliable microgrids and the source of this significant interest is the high efficiency of the DC microgrids compared to the AC microgrids. The fundamental advantages of DC microgrids are the following [1]:

1) non-existence of reactive power;

2) no need for additional DC-AC conversion for PV units;

3) no need for frequency synchronization;

4) no need for the AC-DC conversions for battery energy storage packs.

A fundamental small-scale DC microgrid, which is shown in Fig. 1, is composed of the power generation units, which in our case they are the photovoltaic (PV) units, parallel linked DC-DC converters, batteries for energy storage, and DC-AC inverters for the AC loads [2].

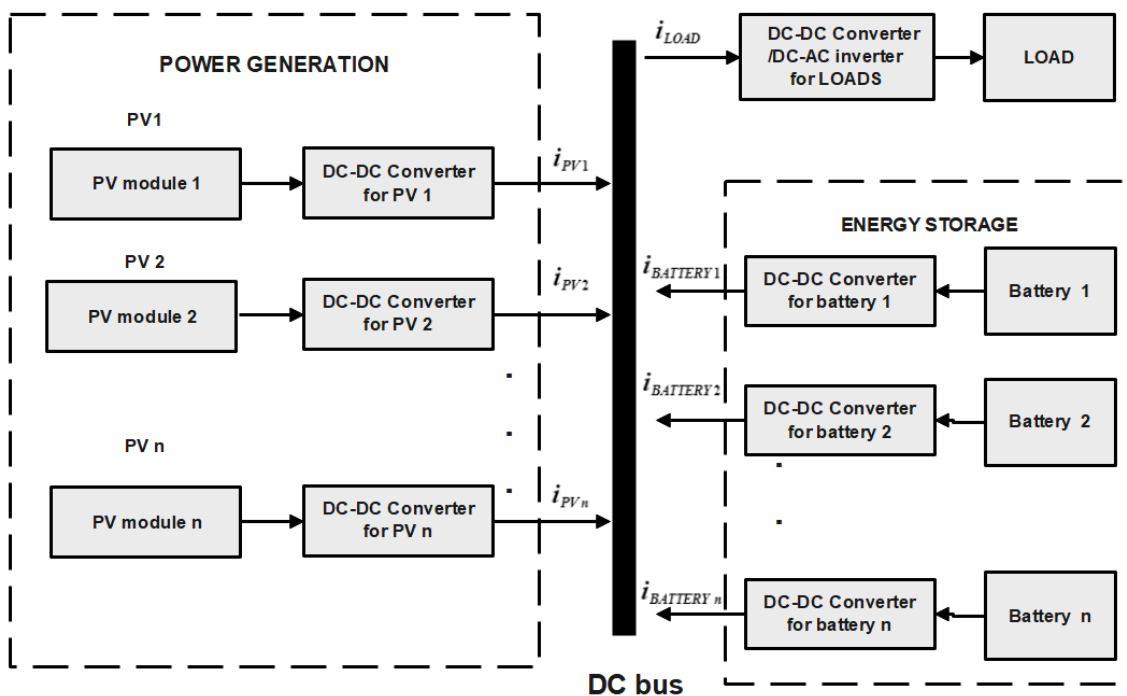


Fig. 1. Simple photovoltaic DC microgrid

PV-based DC microgrids are popular in the field and are considered to be the main supply of the

microgrid. However, PV units are susceptible to the following issues [3]:

- 1) varied levels of solar irradiation;
- 2) partial shading conditions;
- 3) temperatures;
- 4) manufacturing imperfections.

The above-mentioned factors cause the output power and voltage of PV modules to vary, which necessitate the usage of DC-DC converters. The principal purpose of the DC-DC converters is to regulate the output voltage when the input voltage of the converter is unregulated. These converters, which are controlled by PID controllers, are utilized between PV units and DC common bus, battery units and common bus, load, and common bus.

Analysis of publications. Overall, centralized [4-8], decentralized [9-13], distributed [14-19], and hierarchical [20-22] control systems are the fundamental DC microgrid control strategies.

Observability and controllability are prime advantages of central controllers, while these controllers lack flexibility and expandability. Decentralized controllers are advantageous in having no communication links among the units. However, lack of coordination is the main challenge. The advantages of centralized and decentralized controllers can be merged into distributed control systems. However, the complicated design of systems could make it impractical. Hierarchical control strategy integrates all the positive sides of centralized, decentralized, and distributed controllers.

At the heart of these controllers are PI/PID controllers. Traditional PID controllers [23] require a time-consuming tuning process. The increased number of the converters requires tuning of the multiple converters which can be time-consuming and inefficient given all non-ideal characteristics.

Purpose and problem statement. The article aims at developing a new hierarchical control system with a metaheuristic moth-flame optimized PID controllers for the primary, secondary, and tertiary controllers to obtain higher efficiency.

Research results

MFO Algorithm. A metaheuristic population-based moth flame optimization was extensively applied and studied, especially in power electronics, since the year it was presented in 2015. Population-based algorithms initially generate a “population” of the potential solutions to the given problem, which accelerate the total search speed. It also boosts the local optima avoidance capability of the controller. This optimization technique was inspired by the moth’s navigation capability to find its way by adjusting its angle with the moon.

However, around the human-made light sources, they are easily trapped in the spiral trajectory, ending up in a lock around the light source.

The MFO follows the fundamental patterns of the metaheuristic algorithms. It starts the optimization process with the random initialization process of the moths with the P matrix and evaluation function array of OP with the dimension d and flame number n [24].

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1d} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nd} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$OG = \begin{pmatrix} OG_1 \\ OG_2 \\ \vdots \\ OG_n \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Initial moths (potential solutions) are produced using the following equation:

$$G_{ij} = (UB(i) - LB(i))rand() + LB(i). \quad (3)$$

The next component to be initialized is the flame B and its corresponding evaluation function matrix OB :

$$B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1d} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{n1} & B_{n2} & \dots & B_{nd} \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$OB = \begin{pmatrix} OB_1 \\ OB_2 \\ \vdots \\ OB_n \end{pmatrix}. \quad (5)$$

The flame matrix denotes the best solutions obtained at the current iteration.

The logarithmic spiral function is preferred to update the potential solutions for the next iteration.

$$S(G_i, B_j) = |B_j - G_j|_i e^{bt} \cos(2\pi t) + G_j. \quad (6)$$

A simplified pseudocode for MFO is shown in Listing 1.

```

initialization
for i=1 to n do
  the evaluation function computation
while iteration ≤ Max iteration do
  update P(i)
  Compute the flame number
  Compute evaluation function OG
  if iteration==1 then
    B=sort(G) and OB=sort(OG)
  else
    B=sort(P(i-1), P(i)) and OB=sort(P(i-1), P(i))
  end if
  for i= to n do
    for i=1 to d do
      G(i, j) update
    end for
  end while

```

Listing 1 – Simplified Pseudo-code for MFO

Traditional PID control. The design of the traditional PID controller is performed to compare the results with the enhanced MFO-PID controller of the DC microgrid. These controllers are widely adopted in

DC microgrids owing to their efficiency and easy implementation. Three main terms are associated with the PID controller and the total mathematical formula of PID control is the following:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

where $u(t), K_p, K_i, K_d$ are PID's control signal, proportional, integral and derivative gains.

The error is the difference between the desired and actual value. The famous PID control strategy is Ziegler Nichols method. This method starts the tuning process by setting all gains to zero except for the proportional gain, following which the proportional is artificially increased and stopped when the system is unstable. The frequency of the oscillations the maximum proportional gain is measured and gains are calculated. The detailed methodology is presented in [25].

The trial and error method is utilized with the Ziegler Nichols method to obtain satisfactory performance.

Proposed Strategy. An improved hierarchical control system is proposed with metaheuristic algorithms and is depicted in Fig. 2. With the help of three fundamental controllers, which are primary, secondary, and tertiary controllers, superior control can be obtained.

Primary Controllers. Obtaining optimal current sharing at the output stages of the converters is of paramount importance. Small variations in the output voltages can produce the circulating currents which could fail some of the converters. Primary controllers are employed for this purpose to balance the output currents. A lot of topologies have been adopted to

overcome this problem, among which the droop control strategy is one of the most employed control systems. The droop control strategy is based on the presence of virtual resistance, which is not a real resistance, to reduce the output voltage, while increasing the current. The mathematical model is of the following form:

$$V_{O.REF.J}'' = V_{MG.REF} - I_J R_{dj}. \quad (8)$$

where $V_{MG.REF}, I_J, R_{dj}$ are the reference voltage, converter load current, and virtual resistance values, respectively.

However, the current regulation can come at a cost of voltage deviation at the output stage.

At the primary controller stage voltage and inner current loop, controllers exist.

The error voltage for the voltage controller is:

$$e_{o.j.V} = V_{O.REF.J}'' - V_{o.j}; \quad (9)$$

$$I_{Reference} = K_p (e_{o.j.V}) + K_i \int (e_{o.j.V}) dt + K_d \frac{d(e_{o.j.V})}{dt}. \quad (10)$$

The error voltage is fed to the first voltage mode PID controller, the output of which determines the reference voltage for the inner loop current controller:

$$e_{o.j.I} = I_{REF} - I_j. \quad (11)$$

The output of the current controller is

$$I_{regulated} = K_p (e_{o.j.I}) + K_i \int (e_{o.j.I}) dt + K_d \frac{d(e_{o.j.I})}{dt}. \quad (12)$$

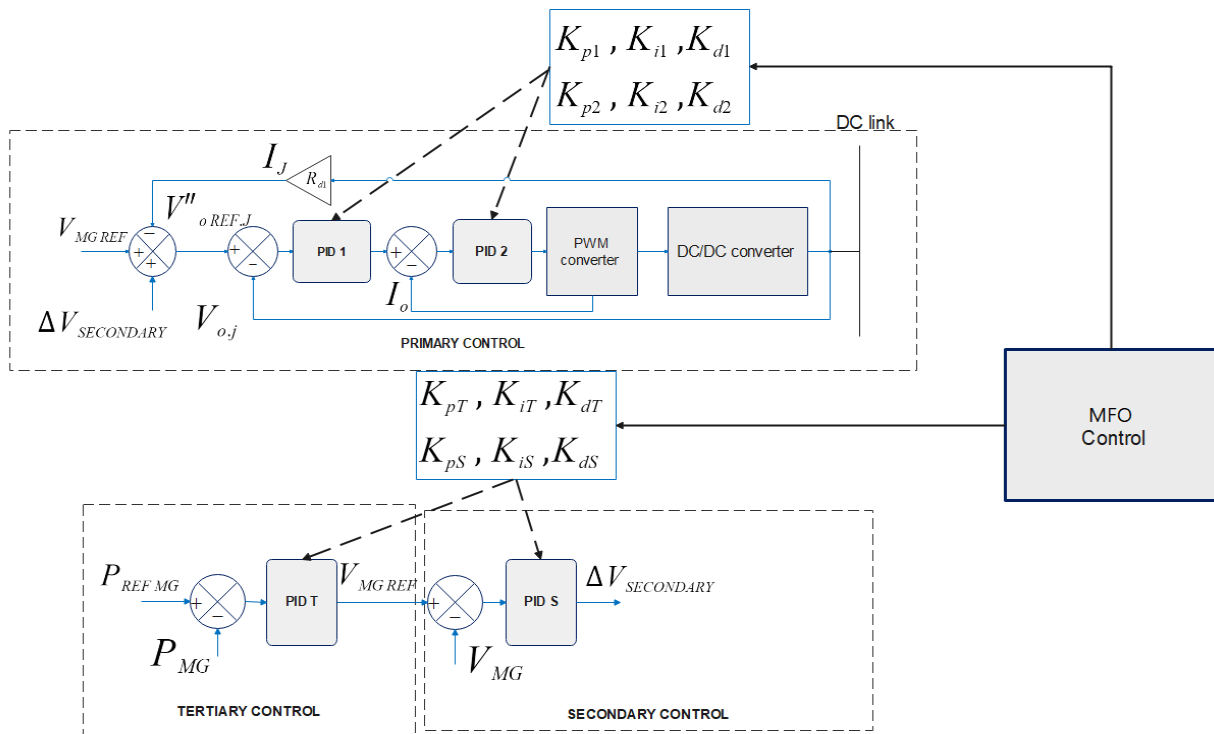


Fig. 2. Proposed control method for DC microgrid

Secondary Controllers. To offset the voltage deviation in the DC link caused by the droop-based primary controllers, secondary controllers are necessary. PID controllers offer simpler and more effective control action and are used:

$$e_{o.j.S} = V_{MG.REF} - V_{MG}; \quad (13)$$

$$\Delta V_{secondary} = K_p(e_{o.j.S}) + K_i \int (e_{o.j.S}) dt + K_d \frac{d(e_{o.j.S})}{dt}. \quad (14)$$

Tertiary Controllers. Tertiary control is the highest level control and functions as an energy flow controller among DC microgrids or between DC microgrid and the main grid.

$$e_{o.j.P} = P_{REF.MG} - P_{MG}; \quad (15)$$

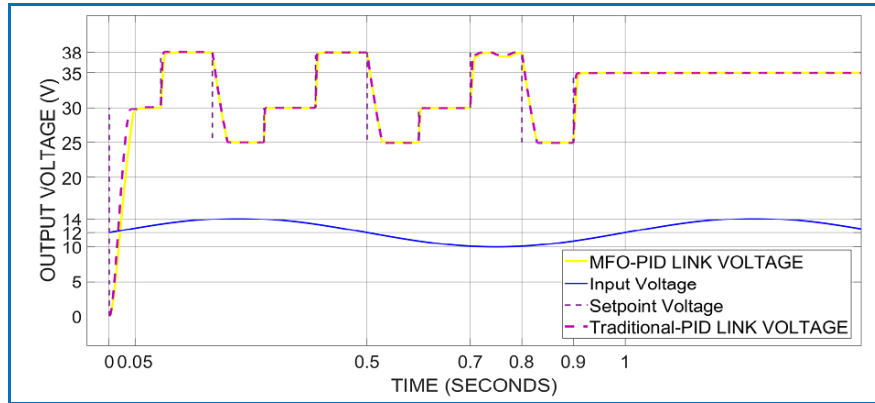
$$V_{MG.REF} = K_p(e_{o.j.P}) + K_i \int (e_{o.j.P}) dt + K_d \frac{d(e_{o.j.P})}{dt}. \quad (16)$$

Simulation results. Simulations are carried out under varying setpoint voltages and input voltages.

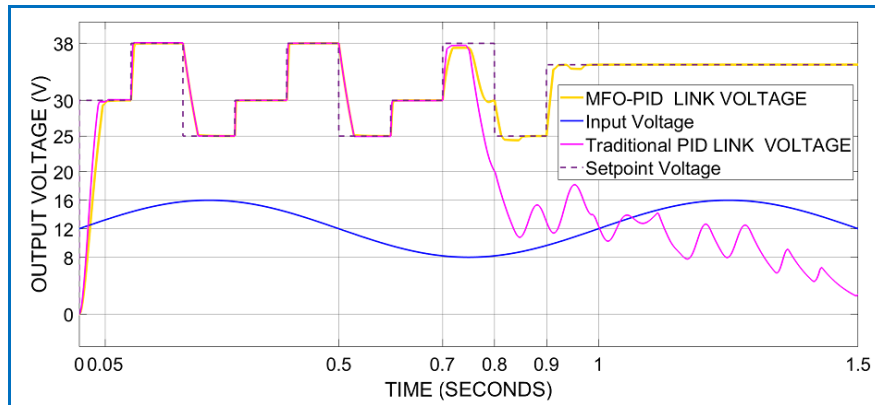
In the first case, which is shown in Fig.3 (a), the input voltage of the DC-DC converters fluctuate between 10V to 14V with 12V DC bias voltage and 2V variation voltage imitating uncertain nature of the PV units. Setpoint voltages take the following values [30, 38, 25, 30, 38..35]. The output load is selected to be 7Ω. As is clear from the graph, the converters with both traditional PID and MFO-PID controllers track the varying setpoint voltages closely.

In the second case, which is shown in Fig. 3 (b), the input voltage variation is increased to 4V with 12V DC bias voltage, which changes the input voltage from 8V to 16V. The load and setpoint voltages are the same as in the previous case. The added variation puts increased stress on the converters. As is clear from the graph, the traditional PID controller was not capable of showing robust performance and it destabilized at time 0.75s. However, MFO optimized controller continued to track the setpoint voltages.

A similar pattern also exists for the power in the DC link in Fig. 4 (a) and Fig.4 (b).



a – 2V input variation



b – 4V input variation

Fig. 3. DC link voltage

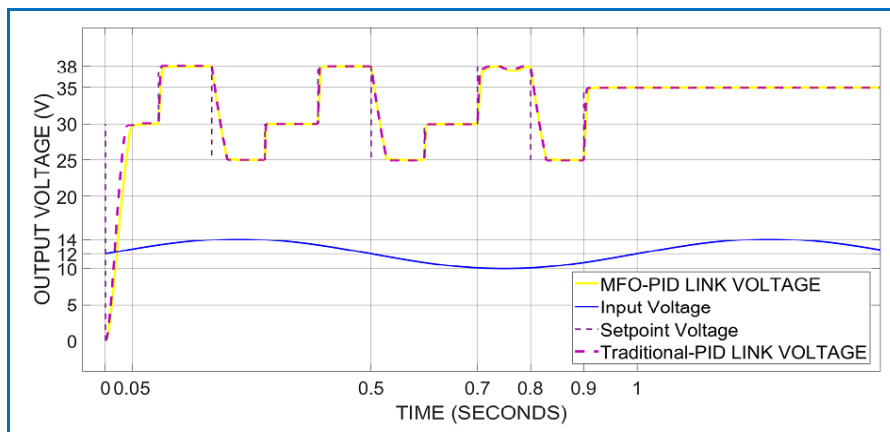
Conclusions

An optimized DC microgrid hierarchical control system whose PID controllers are adaptively tuned is proposed in this paper. The centralized MFO-PID tuner is designed and implemented for the tuning of all PID controllers in DC microgrid. The results are compared

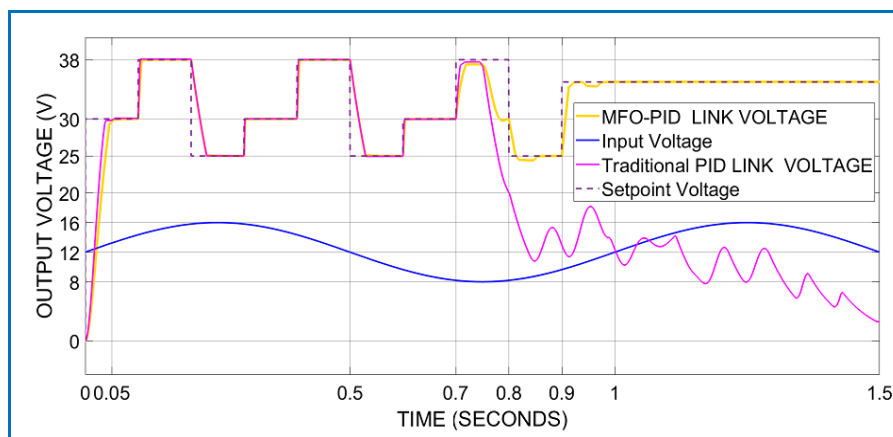
with the traditional tuning methods, outcomes of which verified the superiority of the proposed approach by increased robustness in DC link voltage.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.



a – 2V input variation



b – 4V input variation

Fig. 4. DC link power

REFERENCES

1. Zhang, F., Meng, Ch., Yang, Y., Sun, C., Ji, Ch., Chen, Y., Wei, W., Qiu, H. and Yang, G. (2015), "Advantages and challenges of DC microgrid for commercial building a case study from Xiamen university DC microgrid", *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 355-358, doi: <https://doi.org/10.1109/ICDCM.2015.7152068>.
2. Konar, S. and Ghosh, A. (2015), "Interconnection of islanded DC microgrids", *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2015.7380986>.
3. Ransome, S., Sutterlueti, J. and Sellner, S. (2012), "PV technology differences and discrepancies in modelling between simulation programs and measurements", *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 003.061-003.066, doi: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6318228>.
4. Mehdi, M., Kim, C.-H. and Saad, M. (2020), "Robust Centralized Control for DC Islanded Microgrid Considering Communication Network Delay", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 65-78, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989777>.
5. Cho, J., Kim, H., Cho, Y., Kim, H. and Kim, J. (2019), "Demonstration of a DC Microgrid with Central Operation Strategies on an Island", *2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/ICDCM45535.2019.9232893>.
6. Saleh, M., Esa, Y. and Mohamed, A. (2017), "Centralized control for DC microgrid using finite state machine", *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2017, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8086062>.
7. Bzura, K., Grzejszczak, P., Rafał, K. and Szymczak, M. (2021), "Power flow management algorithms for centralized controller in direct-current microgrid", *2021 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/PAEE53366.2021.9497382>.
8. Zadeh, M.K., Zahedi, B., Molinas, M. and Norum, L.E. (2013), "Centralized stabilizer for marine DC microgrid", *IECON 2013 - 39th Annual Conf. of the IEEE Ind. Electronics Society*, pp. 59-63, doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699667>.
9. Hakuto, Y., Tsuji, T. and Qi, J. (2017), "Autonomous decentralized stabilizing control of DC microgrid", *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 292-296, doi: <https://doi.org/10.1109/ICDCM.2017.8001059>.
10. Abbasi, M., Dehkordi, N.M. and Sadati, N. (2020), "Decentralized Model Predictive Voltage Control of Islanded DC Microgrids", *2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2020, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/PEDSTC49159.2020.9088498>.
11. Yana, S. James, A.F., Emhemed, A. and Burt, G. (2018), "Decentralised Control of DC Microgrid Based on Virtual Admittance to Enhance DC Voltage and Grid Frequency Support", *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541863>.

12. Narayan, N., Mackay L., Malik B.O., Popovic-Gerber J., Qin Z., Bauer P., Zem M. (2019), "Decentralized Control-Scheme for DC-Interconnected Solar Home Systems for Rural Electrification", *2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/ICDCM45535.2019.9232831>.
13. Mahmud, M.A., Roy, T.K., Saha, S., Haque, M.E. and Pota, H.R. (2017), "Control of islanded DC microgrids using nonlinear adaptive decentralized controllers", *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-6.
14. Nasirian, V., Moayedi, S., Davoudi, A. and Lewis, F.L. (2015), "Distributed Cooperative Control of DC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 4, pp. 2288-2303, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2324579>.
15. Jeong, D.-K., Yun, H.-J., Kim, H.-J., Kim, H.-S. and Baek, J.-W. (2017), "Distributed control strategy of DC microgrid for islanding mode operation", *2017 19th Eur. Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'17)*, 2017, pp. 1-5.
16. Kakigano, H., Nishino, A., Miura, Y. and Ise, T. (2010), "Distribution voltage control for DC microgrid by converters of energy storages considering the stored energy", *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2851-285.
17. Peng, J., Fan, B., Yang, Q. and Liu, W. (2021), "Distributed Event-Triggered Control of DC Microgrids", *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 2504-2514, June 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2994532>.
18. Deshmukh, R.R., Ballal, M.S., Talapur, G.G. and Suryawanshi, H.M. (2018), "Distributed Control for Power Management Based on Fuzzy Logic in DC Microgrid", *2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2018.8897485>.
19. Jena, S. and Padhy, N.P. (2020), "Distributed cooperative control for autonomous hybrid AC/DC microgrid clusters interconnected via back-to-back converter control", *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2020, pp. 1-5.
20. Yang, X., Tang, F. Wu X. and Jin, X. (2016), "Hierarchical control strategy of grid-connected DC microgrids", *2016 IEEE 8th Int. Power Electro. and Motion Control Conf.*, 2016, pp. 3723-3727, doi: <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512891>.
21. Yunhao, H., Xin, C., Erde, W., Jianfeng, C., Tingting, H. and Yang, M. (2019), "Hierarchical Control Strategy for Distributed Energy Storage Units in isolated DC Microgrid", *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 7410-7415, doi: <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2019.8866269>.
22. Dahale, S., Das, A., Pindoriya, N.M. and Rajendran, S. (2017), "An overview of DC-DC converter topologies and controls in DC microgrid", *2017 7th Int. Conf. on Power Systems*, 2017, pp. 410-415, doi: <https://doi.org/10.1109/ICPES.2017.8387329>.
23. Zhang, W. and Yang, M. (2014), "Comparison of auto-tuning methods of PID controllers based on models and closed-loop data", *Proc. of the 33rd Chinese Control Conference*, pp. 3661-3667, doi: <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2014.6895548>.
24. Ellis, G. (2012), "Chapter 6 - Four Types of Controllers", *Control System Design Guide (Fourth Edition)*, available online 11 May 2012, pp. 97-119, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385920-4.00006-0>.
25. Mirjalili, S. (2015), "Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm", *Knowledge-Based Systems*, vol. 89, pp. 228-249, Nov. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2015.07.006>.

Received (Надійшла) 10.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Юсубов Ельвін – асистент, аспірант кафедри приладобудування, Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Республіка Азербайджан;

Elvin Yusubov – assistant instructor, PhD student of the Department "Instrument Engineering", Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan;
e-mail: elvinjusubov05@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6199-9266>.

Бекірова Лала – доктор технічних наук, доцент, завідувачка кафедри приладобудування, Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Республіка Азербайджан;

Lala Bekirova – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Instrument Engineering", Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan;
e-mail: lala_bekirova@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0584-7916>.

Розробка ієрархічної системи управління з використанням метаевристичного ПД-регулятора для мікромереж постійного струму

Юсубов Ельвін, Бекірова Лала

Анотація. У цій статті представлено розробку вдосконаленої ієрархічної системи управління з використанням метаевристичного ПД-регулятора для мікромереж постійного струму. Ієрархічне управління є однією з кращих стратегій управління, що використовуються в мікромережах постійного струму на основі фотоелектричних елементів (PV) з трьома рівнями первинних, вторинних та третинних контролерів, в яких ПД-регулювання знаходиться в центрі кожного з цих трьох рівнів управління. Основним завданням основного контролера є забезпечення приблизно рівного розподілу потужності між блоками, вторинного контролера – корекція відхилень у спільній ланці постійного струму, а третинний контролер використовується для управління потоком енергії між блоками постійного струму мікромереж або між мікромережею постійного струму та основною комунальною мережею. Часткове затінення, невизначений характер сонячного випромінювання та мінливі температури значно знижують загальну енергоефективність ієрархічних систем на основі традиційно налаштованого ПД-регулятора, оскільки коефіцієнти налаштування цих ПД-регуляторів не адаптуються до динамічних процесів. Для оптимізації процесу управління розглядається нова ієрархічна система, у якій коефіцієнти ПД-регулювання первинних, вторинних та третинних регуляторів налаштовуються за допомогою метаевристичної оптимізації для адаптації до змін. Моделювання Matlab/Simulink виконується для перевірки ефективності запропонованого підходу. Результати підкреслюють перевагу запропонованого методу за рахунок використання адаптивних переваг процесу.

Ключові слова: ієрархічна система управління; перетворювачі постійного струму; мікромережа постійного струму; метаевристика.

Nabi Iskandarov

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

EFFECT OF AMBIENT TEMPERATURE ON THERMODYNAMIC TEMPERATURE MEASUREMENTS

Abstract. The development of science and technology is closely related to the use of measuring instruments. Measurements are one of the ways to know nature as a process and help to make scientific discoveries and apply these discoveries in production and technology. Measurements are also of great importance as the only means of monitoring technological processes in various fields of industry and production processes. Properly organized measurements ensure the reliability, economy and convenience of conducting production processes, as well as provide opportunities for their extensive automation. In addition, it is not possible to provide safe and trouble-free maintenance of production processes and facilities without using measurement tools. Today, the national economy of the country is provided with a large arsenal of measuring instruments of both domestic and foreign production, from the simplest primary converters and measuring devices to complex automatic tools and systems that allow controlling technological devices and complex production using information and computers. A wide variety of measuring tools requires the right choice for specific purposes. In this regard, one of the important issues is the question of their metrological assurance. Accurate and correct measurements performed during technological processes lead to an increase in product quality, a reduction in waste products, as well as a minimization of time and material losses. For this reason, ensuring the accuracy of temperature measurements performed in technological processes is one of the most urgent issues today. The research work has shown that the most important part of the error of the temperature measurements is the influence of the environment on the measurement process. For this reason, the amount of this effect was determined and analyzed during the research work.

Keywords: technological processes; environmental effects; measurements; thermodynamics; metrology; accuracy.

Introduction

As we mentioned, the set of technical tools that serve to perform measurements, the methods and rules of performing measurements, as well as the interpretation of their results are considered as the concept of measurement technique. The place of measuring technique in our modern world can be characterized by the following information. Currently, the costs of measuring equipment during production processes in industrial enterprises make up approximately 10-15 % of all material consumption. In some areas of the economy, such as oil refining, petrochemistry, chemistry, radio electronics, micro-processor technology, etc., these costs are even 25%.

The section of measuring technique, which includes measuring methods and measuring devices used in technological processes, was considered as a part of technological measurements. The set of measured parameters included in technological measurements are quite different for different industries, mainly depending on the specifics of technological processes. Depending on the nature of the technological process, it is possible to classify all production in different industries mainly into two groups. These are continuous and discrete (numerical) manufacturing technological processes. The first group, i.e. technological processes of a continuous production nature, includes oil refining, drilling, petrochemical, chemical, metallurgical, thermal energy, hydropower, etc. The second group, i.e. discrete (numerical) manufacturing technological processes, includes machine building, device making, radio electronics, food, etc. production areas. Measurement of temperature, pressure, consumption, level and amount of substance in continuous technological processes makes up more than 86 % of the total amount of all measurements. The remaining 14 % measurements are the measurement of the substance's

composition and physical-chemical properties, as well as electrical quantities.

As we mentioned, temperature is the critical factor and the most important parameter used during technological measurements, as well as determining the efficiency of the process and the quality of the product. As we know, there are several ways to measure the temperature of technological processes, and each of them has its own disadvantages. In the course of our research work, the effects of environmental temperature, which have a significant impact on the standardization of metrological assurance of thermodynamic temperature measurements, were investigated. The research work provided the basis for designing a new innovative model. By means of this innovative and modern method, a comparison of temperature measurement tools, especially thermocouples, with traditional process temperature measurement methods was made and it was determined by which methods and tools the accuracy can be increased.

Measuring temperature through traditional measuring methods prevented some of the thermowell problems by eliminating the need to intervene in the technological process. Unfortunately, this method also had its challenges, as the internal temperature of the process could not be accurately or within a reproducible interval due to the environmental temperature effect factor that could affect the measurement.

It is for this reason that during the research, the characteristics of the ambient temperature, which affect the thermodynamic temperature measurements, were studied and analyzed.

Method and materials

During the research work, the effect of ambient temperature on thermodynamic temperature

measurements in technological processes was investigated and this effect was analyzed through comparative tests. These tests were performed under both artificial and natural environmental conditions and the results were compared.

The following materials were used during the research work.

- 1) technological pipe with a diameter equal to 20 cm;
- 2) oil solution;
- 3) K type thermocouple;
- 4) artificial wind generator;
- 5) simulator.

In order to carry out this research, an experimental experiment was conducted to determine the temperature of the oil solution when it flows through the pipe. During the experiment, oil began to flow from inside the pipe with a diameter of 20 cm. At this time, in order to determine the temperature of the pipe surface, a surface sensor and a transmission head are connected to the pipe surface. An experiment was then carried out on how the temperature from the pipe to the transmitter head can be distributed in the surface sensor assembly (Fig. 1).

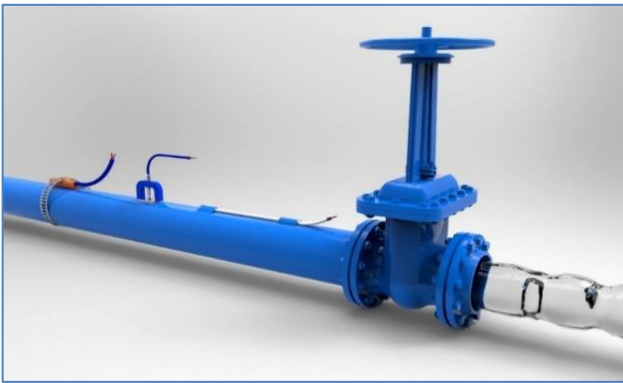


Fig. 1. Measuring the temperature of the liquid flowing through the pipe

During the conducted experiments, the importance of the surface temperature affecting the temperature of the oil solution passing through the pipe and the ambient temperature affecting that pipe was determined.

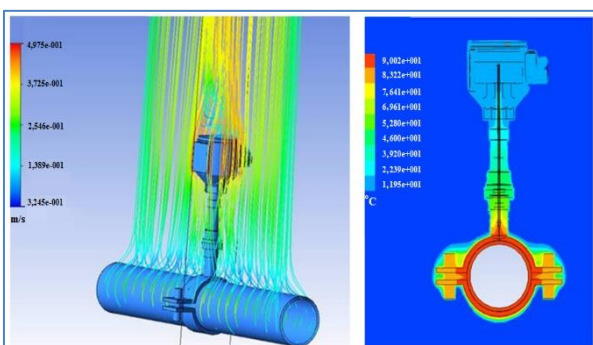


Fig. 2. Simulation of free convection

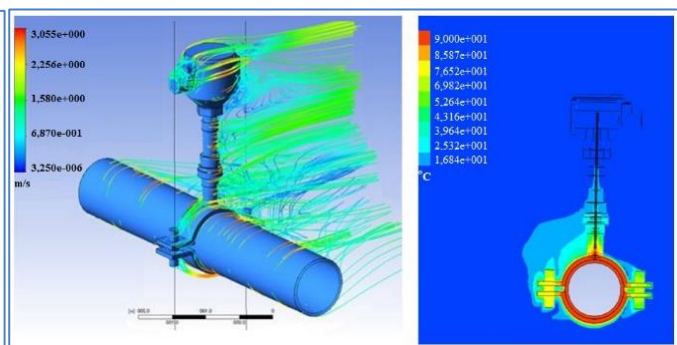


Fig. 3. Simulation of forced convection (wind speed increased by 2 m/s)

During the conducted research, the ambient temperature and wind speed were repeatedly measured at different time intervals in the simulation of forced convection. At this time, the existing wind speed

Analysis of the effect of ambient temperature on the thermocouple

In the tests carried out during the research work, it was determined that there is a non-linear relationship between the temperature of the liquid flowing through the pipe and the thermal effect of the ambient temperature on the pipe. To correct and linearize this nonlinear relationship, it is relatively difficult to model it. The use of insulation for the temperature measurement assembly can reduce much of the non-linear heat transfer and also help create a one-dimensional heat transfer profile for the temperature assembly and transfer head. Such linearization of heat transfer does not eliminate all inaccuracies in the measurement of tube surface temperature, but it reasonably allows finding a solution to correct for changing and constant environmental and process conditions.

During the research work, free convection of the thermocouple attached to the pipe was initially performed. During free convection, the thermodynamic temperature of the oil liquid passing through the pipe was determined under normal ambient conditions. Free convection simulation was analyzed during the experiment.

Then, a forced convection environment was created for the thermocouple placed on the technological pipe through which the oil solution passes. At this time, a wind with a speed of 2 m/s was created by means of an artificial wind generator, and its effect on the thermocouple was studied. During the conducted tests, it was determined that the ambient temperature affects the temperature of the material passing through the pipe in the range of 10-18%, both through free and forced convection. Fig. 2 and Fig. 3 show the heat loss profiles from the surface temperature unit to the ambient for both free and forced convection.

During the conducted research, the ambient temperature and wind speed were measured at different time intervals in the simulation of free convection. At that time, the temperature coefficient was in the range of $1,195e+001$ and $9,002e+001$, and the wind speed was in the range of $3,245e+001$ and $4,975e+001$.

(between $3,245e+001$ and $4,975e+001$) was increased by 2 m/s.

As a result of this increase, the temperature coefficient changed between $1.684e+001$ and $9.00e+001$.

Later, during the performed research, tests were conducted to measure the thermodynamic temperature of the fluid in the pipeline using an immersion resistance thermocouple.

The figure below shows the measurement of the temperature of the liquid in the pipeline using an immersion resistance thermocouple and the comparison of the temperature of the thermally insulated surface of the pipe (Fig. 4).

During the test performed, the ambient temperature varies between 24 °C and 31 °C, while the process thermodynamic temperature remains stable at 30 °C.

As the difference between the thermodynamic temperature of the process and the temperature of the environment affecting the process increases, the difference between the thermodynamic temperature of

the process and the temperature of the surface changes up to 2 °C.

Also, the same behavior can be seen with a similar change in ambient temperature as shown in Fig. 5.

Under the same test conditions, the ambient temperature drops from 30 °C to -5 °C. As the difference between the thermodynamic temperature of the process and the ambient temperature increases, the difference between the thermodynamic temperature of the process and the temperature of the surface changes to almost 15 °C

In the graph shown in Figure 6, the difference between the technological process temperature and the surface temperature during the test performed under changing environmental conditions is considered as a variable.

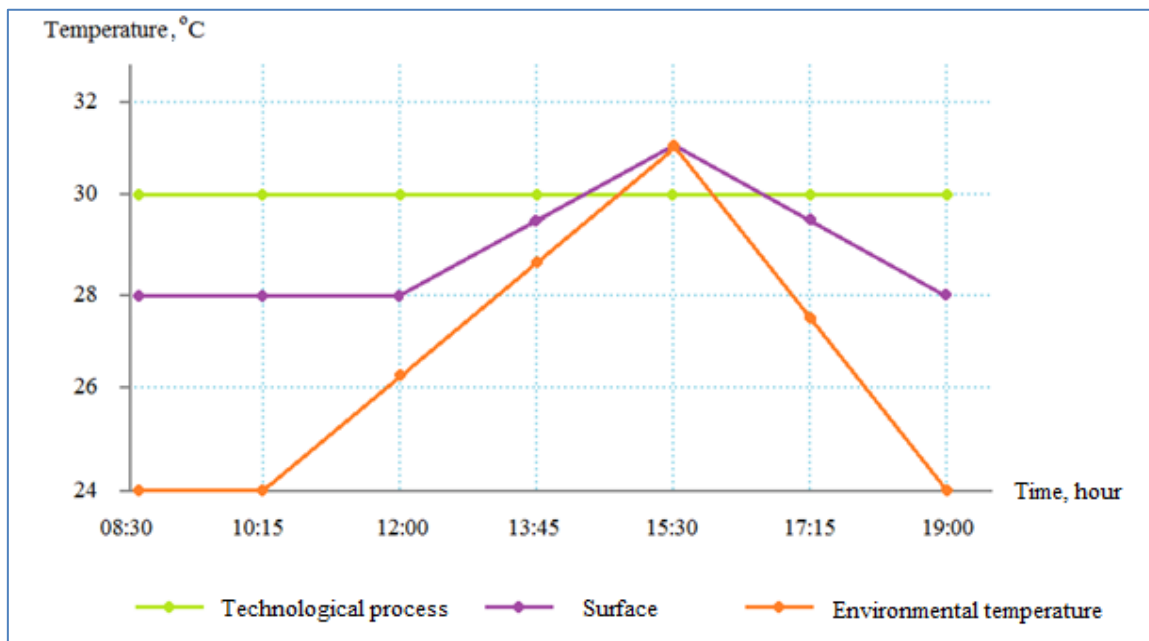


Fig. 4. Comparison of surface sensor and thermocouple detector at constant process temperature

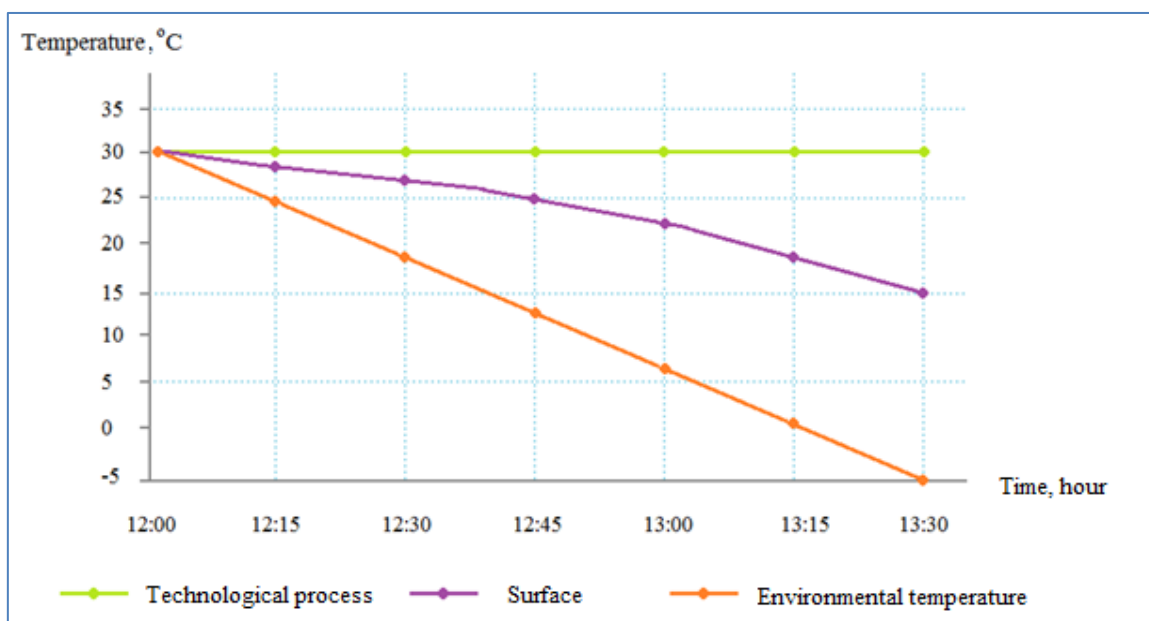


Fig. 5. Comparison of insulated surface sensor and thermocouple detector during ambient temperature changes

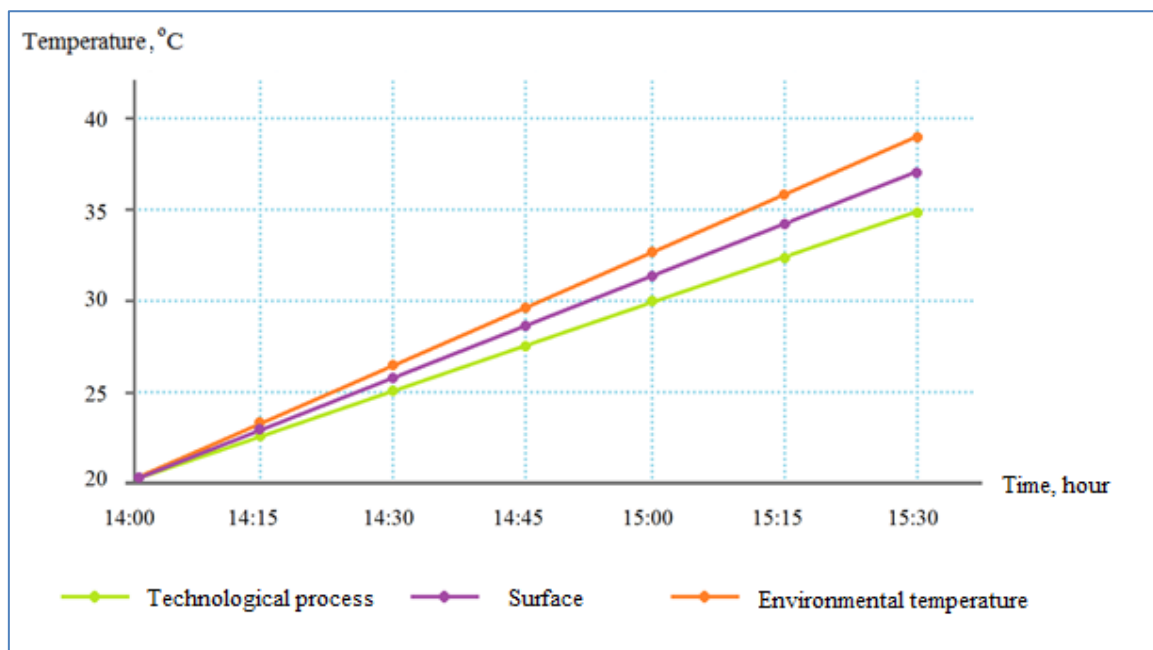


Fig. 6. Graph of dependence of surface temperature with technological process

As the process temperature rises, the error or difference between the process temperature and the surface temperature increases.

This relationship makes it difficult to compare the two values because it depends on the process temperature, the ambient temperature, and the thermal conductivity of the measuring device.

The above-mentioned graphs suggest that one of the most important methods of increasing the accuracy of temperature measurements performed during technological processes is the minimization of the environmental temperature affecting these measurements.

During the performed test work, it was determined that the temperature of the liquid flowing through the pipeline can vary depending on the ambient temperature and the surface temperature of the pipe. However, this variation is not taken into account during thermodynamic temperature measurements.

Conclusions

During the conducted research, the environmental conditions affecting the change of this temperature

during the thermodynamic temperature measurement at all stages of the technological process were analyzed. Analyzes performed during the experiment were compared using free and forced convections.

During the performed test work, it was determined that the temperature of the liquid flowing through the pipeline can vary depending on the ambient temperature and the surface temperature of the pipe. However, this variation is not taken into account during thermodynamic temperature measurements.

This significantly affects the accuracy of temperature measurements performed in industrial enterprises and production processes.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgment

The author Nabi Iskandarov is thankful to Head of Instrument Engineering Department of Azerbaijan State Oil and Industry University, professor Lala Bakirova for support in conducting the research work.

REFERENCES

- Grgic, G. and Pusnik, I. (2011), "Analysis of thermal imagers", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 32, No. 1-2, pp. 237-247.
- Pearce, J., Edler, F., Elliott, C., Greenen, A., Harris, P., Izquierdo, C., Kim, Y., Martin, M., Smith I., Tucker, D. and Velcheva, R. (2018), "A systematic investigation of the thermoelectric stability of Pt–Rh thermocouples between 1300 °C and 1500 °C", *Metrologia*, Vol. 55, No. 4, pp. 558–567, doi: <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aacbf7>
- Ceng, Z. and Liu, J. (2008), "Effect of fixing material on skin-contact temperature measurement by wearable sensor", *5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors*, 1-3 June 2008, Hong Kong, China, pp 137–140, doi: <https://doi.org/10.1109/ISSMDBS.2008.4575037>
- Hreha, P., Radvanska, A., Knapcikova, L., Legutko, S., Krolczyk, J., Hloch, S. and Monka, P. (2016), "Roughness parameters calculation by means on-line vibration monitoring emerging from AWJ interaction with material", *Metrology and Measurement Systems*, vol. 22, pp. 315-326, doi: <https://doi.org/10.1515/mms-2015-0024>.
- Rodiet, C., Remy, B. and Degiovanni, A. (2016), "Optimal wavelengths obtained from laws analogous to the wien's law for monospectral and bispectral methods, and general methodology for multispectral temperature measurements taking into account global transfer function including non-uniform emissivity of surfaces", *Infrared Phys. Technol.*, Vol. 76, pp. 444–454.

6. Webster, E. (2016), "Thermal preconditioning of MIMS Type K thermocouples to reduce drift", *Int. J. Thermophys.*, Vol. 38, No. 5, pp. 25-26, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2140-3>
7. Al-Nuaimi, I. A., Bohra, M., Selam, M., Choudhury, H. A., El-Halwagi, M. M. and Elbashir, N. O. (2016), "Optimization of the aromatic/paraffinic composition of synthetic jet fuels", *Chem. Eng. Technol.*, Vol. 39, issue 12, pp. 2217–2228, DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201500513>
8. Webster, E. and Saunders, P. (2019), "Characterizing drift behavior in Type S thermocouples to predict in-use temperature errors", *Int. J. Thermophys.*, Vol. 41, No. art. 5, doi: <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2579-0>
9. Bayramov, M. R., Hajiyev, M. M., Mirzayeva, M. R. and Mammadov, I. Q. (2018), *Workshop on petrochemistry and petrochemical synthesis*, textbook, Vol. 1, 201 p.
10. Wang, X., Jia, T.; Pan, L., Liu, Q., Fang, Y., Zoul, J. and Zhang, X. (2021), "Review on the relationship between liquid aerospace fuel composition and their physicochemical properties", *Trans. Tianjin Univ.*, Vol. 27, pp. 87–109, doi: <https://doi.org/10.1007/s12209-020-00273-5>
11. Grazia, L., Christoph S. and Bernhard, W. (2020), "On the importance of kinetic effects in the modelling of droplet evaporation at high pressure and temperature conditions", *Fluid Mechanics and Its Applications*, Vol. 121 : Droplet Interactions and Spray Processes, pp. 277–286, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33338-6_22
12. Tucker, D., Andreu, A., Elliott, C., Ford, T., Neagu, M., Machin, G. and Pearce, J. (2018), "Integrated self-validating thermocouples with a reference temperature up to 1329 °C", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 29, pp. 1–9.
13. Yun, S. J., Abidov, A., Kim, S., Choi, J. S., Cho, B. S. and Chung, S. C. (2018), "Water vapor transmission rate property of SiNx thin films prepared by low temperature (<100 C) linear plasma enhanced chemical vapor deposition", *Vacuum*, Vol. 148, pp. 33–40.
14. Vozka, P., Modereger, B., Park, A., Zhang, W., Triced, R., Kenttämää, H. and Kilaz, G. (2019), "Jet fuel density via GC×GC-FID", *Fuel*, Vol. 235, pp. 1052–1060, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.110>
15. Webster, E. (2020), "Trials of Pt-20 %Rh vs. Pt thermocouples between 157 °C and 962 °C", *Metrologia*, Vol. 57, pp. 47-49.
16. Kim, Y., Lee, Y. and Joung, W. (2017), "Temperature dependence of the thermoelectric inhomogeneity for Type B thermocouples from 180 °C to 960 °C", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 28, No. 5, pp. 24–26, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa6366>
17. Webster, E., Greenen, A. and Pearce, J. (2016), "Inhomogeneity in Type B and Land-Jewell noble-metal thermocouples", *Int. J. Thermophys.*, Vol. 37, Article number: 70, doi: <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2074-9>
18. Nurfatihah, J., Jesbains, K., Pandey, A., Shahabuddin, S., Hassani, S., Saidur, R., Rasit, R., Azwadi, N. and Naim, M. (2019), "A Review on Nano Enhanced Phase Change Materials: An Enhancement in Thermal Properties and Specific Heat Capacity", *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, No. 57, pp. 24-28.
19. Stoll, A.M. and Hardy, J.D. (2019), "Direct experimental comparison of several surface temperature measuring devices", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 20, No. 9, pp. 678–686.
20. Farzana, N.H., Aliyev, G.Kh. and Abbasova, S.M. (2005), *Technological measurements and devices*, Textbook, ADNA, Baku, 78 p.

Received (Надійшла) 07.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Іскандаров Набі – докторант, Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Республіка Азербайджан;

Nabi Iskandarov – doctoral student, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan;

e-mail: nabi.iskandarov@engineer.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5241-5513>.

Вплив температури навколишнього середовища на термодинамічні вимірювання температури

Н. Іскандаров

Анотація. Розвиток науки і техніки тісно пов'язаний із застосуванням вимірювальних приладів. Вимірювання є одним із способів пізнати природу як процес і допомагають робити наукові відкриття та застосовувати ці відкриття у виробництві та техніці. Вимірювання мають велике значення також як єдиний засіб контролю технологічних процесів у різних галузях промисловості та виробничих процесів. Правильно організовані вимірювання забезпечують надійність, економічність і зручність ведення виробничих процесів, а також надають можливості для їх широкої автоматизації. Крім того, без використання вимірювальних засобів неможливо забезпечити безпечно та безаварійне обслуговування виробничих процесів і обладнання. Сьогодні народне господарство країни забезпечене великим арсеналом засобів вимірювальної техніки як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва, від найпростіших первинних перетворювачів і вимірювальних пристроїв до складних автоматичних засобів і систем, що дозволяють керувати технологічними пристроями і складним виробництвом за допомогою інформації та ЕОМ. Велика різноманітність вимірювальних інструментів вимагає правильного вибору для конкретних цілей. У зв'язку з цим одним із важливих питань є питання їх метрологічного забезпечення. Точні і правильні вимірювання, що проводяться в технологічних процесах, призводять до підвищення якості продукції, зменшення відходів, а також мінімізації часових і матеріальних втрат. Тому забезпечення точності вимірювань температури в технологічних процесах є однією з актуальних проблем сьогодення. Дослідження показали, що найважливішою частиною похибки вимірювань температури є вплив навколишнього середовища на процес вимірювання. З цієї причини кількість цього ефекту була визначена та проаналізована під час дослідницької роботи.

Ключові слова: технологічні процеси; вплив на навколишнє середовище; вимірювання; термодинаміка; метрологія; точність.

Helen Makogon¹, Vitaliy Sirosh¹, Serhiy Guba¹, Oleksandr Lavrut², Sergiy Zagrebelnyy², Andriy Rudiy²

¹ Military Institute of Tank Troops of National Technical University, Kharkiv, Ukraine;

² Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE ESTIMATING METHODOLOGY OF A 5TDF ENGINE MOTOR RESOURCE CONSUMPTION UNDER DIFFERENT OPERATING MODES OF THE MACHINE

Abstract. The **subject matter** of the article is accounting for the motor resource of the 5TDF tank engine under different operating modes. The **goal** of the study is to development of a methodology for estimating the consumption of a motor resource of a 5TDF engine under different operating modes of the machine. **The tasks** to be solved are: based on the analysis of data on the operating modes of the 5TDF engine, to determine a set of parameters that give empirical and analytical estimates of the consumption of the motor resource of the machine; to request analytical estimates of the consumption of the 5TDF engine motor resource in terms of the number of years' service in different machine operating modes; to propose a mechanism for the processing of numerical values, depending on the results of the statistical processing of these machine operation data. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The following **results** were obtained: A continuous functional dependence of the actual number of hours spent by the engine on the values of the meter per hours at different speeds, allow more careful accounting of engine consumption, but will involve the development of special devices based on modern elements has been determined. **Conclusions.** It is possible to make a conclusion about the nonlinear nature of the dependence of the engine life on time with different engine operation at different load modes. Engine operating modes, which are determined by load resistance, are characterized by the number of revolutions of the engine crankshaft and the amount of power developed by the engine, largely determine its energy and economic performance of the engine and engine consumption. The testing ground for the consumption of the motor resource of the machine, depending on the readings of the engine hours counter, can be formed on the basis of the data obtained from the results of the operation of the machine in different conditions. The analysis of the results of the research carried out that finding dependence of a 5tdf engine motor resource can be presented as the sum of two regressions – linear and hyperbolic. The readings of the engine hours counter will be recorded and further processed when the 5TDF engine is running in I-V and VI, VII gears, respectively. Such realization will make it possible to use the regression equation directly for the car crew.

Keywords: consumption of motor resource of the 5TDF engine; regression equation; least squares method; accounting for tank hours counters.

Formulation of the problem and research tasks

A tank diesel engine is a complex multi-component unit with a service life set by the manufacturer. The concept of diesel engine life means a certain number of hours that a new power unit of this type must be guaranteed to work. Under the end of the diesel life should be understood that further operation of the engine becomes impossible without overhaul of the power plant.

The service life of a tank engine depends on the quality of diesel engine oil, timely maintenance, serviceability of the diesel engine fuel system and other internal combustion engine systems. Diesel units are also extremely sensitive to overheating, which requires constant monitoring of the cooling system.

The engine life of an internal combustion engine depends on its design features, as well as individual operating conditions.

In the near future, the 5TDF tank engine and its modifications will remain widely used on AMWE models of the Armed Forces, therefore, the development of methods for more careful accounting of engine life is an urgent scientific and technical task [1].

Analysis of recent research and publications.

The issue of accounting for motor resources was indeed one of the "sickest" for the Soviet tank troops. The idea to create a device that can accurately consider the

different types of load on the tank engine was proposed by the famous Kalashnikov shortly before World War II, but due to objective reasons, was not implemented. The development of the element base, SAD-tools, tools for collecting data on the state of the engine makes it possible not only to improve the performance of the machine, but also to more accurately assess the consumption of its engine life [2].

Traditionally, the consumption of motor resources is planned for the list number of machines and power units, but not more than the amount provided by the regular purpose, and within the established norms, subject to uniform (stepped) output of machines for repair during the year. At the same time one hour of work of the car (power unit) is equated to run (the specified norm at writing off of fuel and oils is not applied).

The methodology for accounting for the operation of a power plant under more severe operating conditions (for example, when working with a minesweeper, in rough terrain, severe climatic conditions, etc.) is also not complete enough.

The need for such an account was considered by the designers of the T-72 tank. In particular, two hours counters were installed on the T-72M Ural tank. However, the ideology of using unlimited resources and simplifying technology at the end of the Soviet Union, the collapse of the latter and the lack of funding for independence, buried this idea.

Thus, the development of methods for accounting for the engine life of the tank 5TDF engine in different modes of operation is **relevant**.

The **goal** of the study is to develop a method for estimating the consumption of engine life 5TDF engine in different modes of operation of the machine.

This goal defined the following research **tasks**:

–on the basis of the 5TDF engine data on operating modes analysis to define set of the parameters giving empirical and analytical estimations of an expense of a motor resource of the car.

–to offer analytical dependences of an estimation of an expense of a motor resource of the 5TDF engine on quantity of the fulfilled motor-hours at different modes of operation of cars

– to offer the mechanism of calculation of numerical values, proceeding from results of their statistical processing of data of operation of the vehicle.

– to analyze the constructive possibilities of practical implementation of the developed technique in view of the available control and measuring devices installed on the sample T-64B.

Main material

1. Relationship between the operating modes of the 5TDF engine and parameters give empirical and analytical estimates of the consumption of the machine motor resource. To assess the performance of engines when operating at different load modes, it is customary to use the following parameters: effective power; torque, average effective pressure.

Dependences of the basic indicators of work of the engine on turns of a cranked shaft are accepted to name speed characteristics.

The external characteristic of the engine, being the main, allows to estimate:

- limit values of power and torque in all range of change of turns;
- characteristic speed modes;
- the area of the most economical speed modes;
- traction (dynamic) qualities of the engine.

For example, at idle, the specific indicator fuel consumption is about twice as high as at higher loads.

These indicators are indirect in relation to the consumption of the motor resource of the engine, however, based on their analysis, conclusions can be drawn:

There is a direct dependence of the ICE resource on the wear of the cylinder-piston group.

Constant driving at extreme loads or other difficult conditions can reduce the declared engine life by up to 2-3 times. Maintaining the operating temperature of the internal combustion engine is extremely important so that the loaded parts are effectively cooled in order to prevent rapid wear and damage to the mechanism parts, in particular, jamming of the pistons in the cylinders.

In addition, it is possible to make a platoon about the nonlinear nature of the dependence of the engine life on time with different engine operation at different load modes.

Engine operating modes, which are determined by load resistance, are characterized by the number of

revolutions of the engine crankshaft and the amount of power developed by the engine, largely determine its energy and economic performance of the engine and engine consumption [3].

2. Analytical dependences of an estimation of an expense of a motor resource of the 5TDF engine on quantity of the fulfilled motor-hours at different modes of operation of cars. We'll assume that accounting for the actual consumption of a motor resource depending on the number of hours worked by the engine, in the simplest case, can be carried out according to the general expression:

$$MR(m) = \sum_{i=1}^k a_{ni} m_{ni}. \quad (1)$$

where a_{ni} – load factor having a positive value; k – the number of intervals the engine speed range can be divided $[n_{\min}; n_{\max}]$; m_{ni} – the number of engine hours according to the meter readings when the engine is running at speed in the i -th interval $n_i \in [n_{\min}; n_{\max}]$.

Traditionally, the range $[n_{\min}; n_{\max}]$ determines the intervals corresponding to the engine idling speed, operating speed and speed at which the machine operates in difficult conditions at full load. So, we accept $k = 3$.

So, for the 5TDF engine the full range can be assigned as $[800, 3000]$.

To continue the operation of the 5TDF, it is necessary to designate the intervals for changing the wraps, as to allow the idling of the robotic engine, the robotic operation in the normal operating mode, and in the case of robotic navigation:

$$[n_{\min}, n_{is}], [n_{os1}, n_{os2}], [n_l, n_{\max}], \quad (2)$$

In the simplest version for practical implementation, it can be assumed that the value of the load factor is constant over the entire i -th interval

$$a_{ni} = const, \quad (3)$$

then expression (1) can be written:

$$MR = a_1 m_{is} + a_2 m_{os} + a_3 m_l, \quad (4)$$

where m_{is} –the number of hours worked by the engine according to the meter at idle speed in a certain interval; m_{os} – the number of hours worked by the engine according to the meter at operating speed in a certain interval; m_l –the number of hours worked by the engine according to the meter at speeds corresponding to the operation of the engine under load in difficult conditions in a certain interval; a_1, a_2, a_3 – are positive numerical coefficients.

Let's note that the use of expression (1) in practice is not a complicated procedure for the crew of the machine, although it requires minimal design refinement.

The accuracy of the obtained results can be increased by reducing the sampling step over the entire range of engine revolutions $[n_{\max}, n_{\min}]$.

Undoubtedly, the introduction of a continuous functional dependence of the actual number of motor hours worked by the engine on the values of the motor-

hour counter indicator at different revolutions will enable a more thorough accounting of motor resource consumption, but will be associated with the development of special devices based on a modern element base.

In this case, expression (1) will have the form:

$$MR(m) = \int_{n_{min}}^{n_{max}} a(m) dn. \tag{5}$$

Since the dependence $M(m)$ is non-linear, it is appropriate to consider its derivative as its qualitative characteristic $\frac{\partial MR}{\partial m} \cdot \frac{\partial m}{\partial n}$, based on the fact that the reading of the engine hours counter is a function of the engine revolutions. That is,

$$a(m) = \frac{\partial MR}{\partial m} \cdot \frac{\partial m}{\partial n}. \tag{6}$$

Provided that the assumption (3) is made, it is possible to accept the expression in a close examination

$$a(m) = \frac{\Delta MR}{\Delta m};$$

$$\Delta MR = MR_{beg} - MR_{fin}; \tag{7}$$

$$\Delta m = m_{beg} - m_{fin},$$

m_{beg} – the value of the engine hours counter indicator at the beginning of the i -th interval;

m_{fin} – the value of the engine hours counter indicator at the end of the i -th interval.

Expression (7) can be transformed as follows:

$$a(m) = \frac{MR_{kinu} - MR_{noch}}{m_{kinu} - m_{noch}} =$$

$$= \frac{\frac{MR_{kinu}}{MR_{noch}} - \frac{MR_{noch}}{MR_{noch}}}{\frac{m_{kinu}}{m_{noch}} - \frac{m_{noch}}{m_{noch}}} = \frac{\frac{MR_{kinu}}{MR_{noch}} - 1}{\frac{m_{kinu}}{m_{noch}} - 1}. \tag{8}$$

The relation follows from expression (8)

$$\frac{MR_{kinu}}{MR_{noch}} - 1 = a(m) \left(\frac{m_{kinu}}{m_{noch}} - 1 \right). \tag{9}$$

To simplify the procedure of statistical processing of operating data, we accept

$$\frac{MR_{finish}}{MR_{start}} \approx a(m) \left(\frac{m_{finish}}{m_{start}} \right) \tag{10}$$

and, taking into account the energy and economic indicators of the engine, we will assume

$$\frac{MR_2}{MR_1} \approx \frac{Gf_2}{Gf_1} \approx \frac{S_1}{S_2} \approx \frac{v_1}{v_2} \approx a(m) \frac{m_2}{m_1}, \tag{11}$$

where MR – engine resource consumption, engine hours; Gf – hourly fuel consumption kg/h; S – range, km; v – vehicle speed, km/h; respectively at revolutions n_1 and n_2 , ($n_2 > n_1$).

Expression (10) is the most suitable for processing statistical data obtained during machine operation.

The relationship between MR , Gm , v and S values is determined based on the design of the machine's power plant and accepted standards of its operation.

So, based on the values of Gm , v and S obtained during the operation of the car in different road conditions and under different loads, the values of MR are calculated, which we will consider as the starting point for finding the coefficients a , b , c of the regression equation (4). When collecting statistical data, it is suggested to keep track of the selected gear in which the car is moving: $p = \overline{1, P}$, P – the number of gears the car moves.

Thus, the testing ground for the consumption of the motor resource of the machine, depending on the readings of the engine hours counter, can be formed on the basis of the data obtained from the results of the operation of the machine in different conditions (table 1). The value of MR (column 6) is calculated based on the data of columns (2)-(5) under different operating conditions of the machine.

Table 1 – Statistical data on motor resource consumption based on the results of machine operation in various operating conditions

Measurement number, i	The crankshaft winding frequency, n , turns/min	Hourly fuel consumption, Gf , kg/h	Range S , km	Vehicle speed v , km/h	Engine resource consumption MR , hours;	The number of the selected gear the car moves, p	The value of engine hours counter indicator, m
1	2	3	4	5	6	7	8
i_{nmin}	n_{min}	G_{nmin}	S_{nmin}	v_{nmin}	MR_{nmin}	p_{nmin}	m_{nmin}
...
i_{n1}	n_1	G_{n1}	S_{n1}	v_{n1}	MR_{n1}	p_{n1}	m_{n1}
i_{n2}	n_2	G_{n2}	S_{n2}	v_{n2}	MR_{n2}	p_{n2}	m_{n2}
....
i_{nmax}	n_{max}	G_{nmax}	S_{nmax}	v_{nmax}	MR_{nmax}	p_{nmax}	m_{nmax}

3. The regression coefficients calculation. To find the regression coefficients a_1 , a_2 , a_3 of the equation (4) by the method of least squares, statistical data were obtained according to the table. 1:

It is proposed to calculate the regression coefficients in a matrix manner.

Let's present the simulation data and regression coefficients in matrix form

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1m} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n1} & m_{2m} & \dots & m_{nm} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix}, \quad MR = \begin{bmatrix} MR_1 \\ MR_2 \\ \dots \\ MR_n \end{bmatrix},$$

where MR – an n -dimension column of the independent variable; X – an $n \times m$ -dimension matrix of the tank engine hours counter indicators; A – an n -dimension column vector of the regression equation coefficients; E – is a n -dimension column vector of deviations of the dependent variable y_i from similar values obtained by the regression equation:

$$\widehat{MR}_i = a_1 m_{i1} + a_2 m_{i2} + \dots + a_n m_{in}. \quad (13)$$

In the matrix view we obtain:

$$e = Y - MA. \quad (14)$$

By the least square's method

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = e^T e = \quad (15)$$

$$= (MR - MA)^T (MR - MA) \rightarrow \min.$$

It can be shown that the front of the mind is concatenated, as if the Vector

$$A = (M^T M)^{-1} M^T MR. \quad (16)$$

After solving equation (15) we obtain the values of the coefficients of the regression equation A^* .

The coefficients of equation (10) can be found as follows:

$$A = (A^*)^T. \quad (16)$$

Thus, based on the obtained values the regression equation (1) and the known $M = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}$ values of the tank's engine hours counter, it is possible to calculate the consumption of the machine's motor resource, taking into account the peculiarities of its operation in different conditions [4-7].

3. Calculation of numerical values, proceeding from results of their statistical processing of data of operation of the vehicle. Statistical data on operation in various conditions were subject to research are as follows:

- movement of the machine on concrete,
- operating with attached equipment of the mine trowl, etc.

The analysis of the results of the research carried out according to formulas (11)-(16) showed that when finding MR as a dependence of $MR = f(Gm, v, S)$ under different operating conditions, expression (9) can be presented as the sum of two regressions – linear and hyperbolic:

$$\frac{MR(m_1)}{MR(m_2)} = MR_1 \left(\frac{m_1}{m_2}\right) + MR_2 \left(\frac{m_1}{m_2}\right), \quad (17)$$

where

$$MR_1 \left(\frac{m_1}{m_2}\right) = b_1 + b_2 \left(\frac{m_1}{m_2}\right) - \quad (18)$$

linear regression;

$$MR_2 \left(\frac{m_1}{m_2}\right) = b_3 + b_4 \left(\frac{m_2}{m_1}\right) = b_3 + b_4 \left(\frac{1}{\frac{m_1}{m_2}}\right) - \quad (19)$$

hyperbolic regression

Note that when reduced to a common denominator, expression (17) can be defined as a polynomial regression equation.

By setting different values of m_1 and m_c , it is possible to study the motor resource consumption under different loads and engine operating modes. As an example, the dependence graph is given $\frac{MR(m_1)}{MR(m_c)}$

In this case, the range of speed changes was in the interval $[0,2v_{max}; 0,8v_{max}]$ corresponds to the machine speed movement of the on the terrain during military operation. As m_2 , the value of the engine hour counter indicators when the car is moving on a paved concrete road is taken.

The obtained results qualitatively coincide with those obtained during stand and natural tests (Fig. 1).

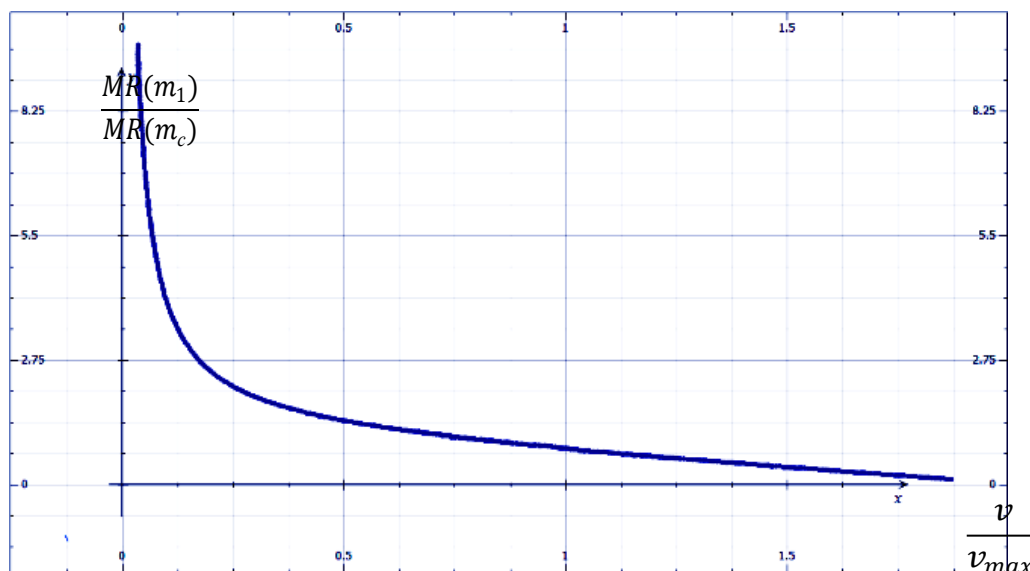


Fig. 1. Motor resource consumption under different loads and engine operating modes

Based on the results of solving equations (12)-(16) the expression is obtained

$$\frac{MR(m_1)}{MR(m_2)} = 1,125 - 0,625 \left(\frac{m_1}{m_2}\right) + 0,3 \left(\frac{m_1}{m_2}\right). \quad (20)$$

Here

$$b_1 + b_3 = 1,125;$$

$$b_2 = -0,625;$$

$$b_4 = 0,3.$$

(21)

Next, the coefficients of the equation (4) were obtained as follows:

$$A^* = (1,001; 1,125; 1,73333) \quad (22)$$

4. Constructive possibilities of practical implementation of the developed technique in view of the available control and measuring devices installed on the sample T-64B. The standard

equipment of the T-64 tank is equipped with one 228 - 110 engine hour meter.

As a prototype, it is proposed to consider the organization of accounting in the T-72M sample. According to the operation of the machine's electrical equipment, the operation of the engine hours counter "under load" is based on an electrical signal from the neutral selector sensor (Fig. 2 a, b).

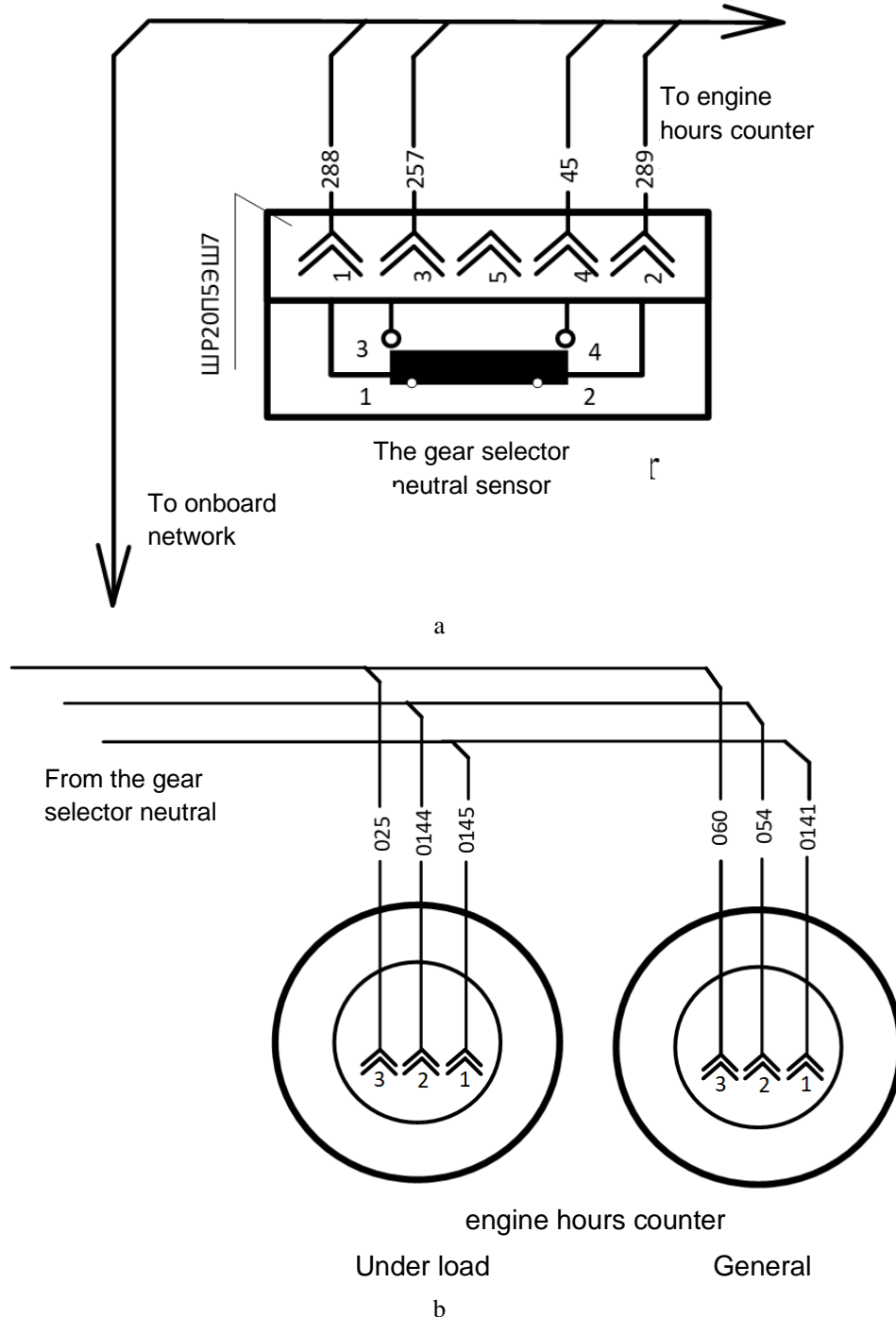


Fig. 2. Electrical diagrams for connecting the neutral sensor of the gear selector of the T-72 tank and the engine hour counters

Unlike the T-72M sample, the T-64B does not have a neutral selector sensor. Without additional installation of such a sensor, the necessary signal can be obtained from the block of switching of the stage

(Fig. 3), which is identical for both machines. In this case, the readings of the engine hours counter will be recorded and further processed when the engine is running in I-V and VI, VII gears, respectively.

Design of obtaining information about the operation of the engine on the model of the T-64 tank is similar to the T-72.

So, the electrical signal from the T-72 neutral selector sensor to the engine hour meter “under load” passes through circuit 0145-0141-078 and “general” hour meter through circuit 025-25-289 (Fig. 2).

By analogy, in the model of the T-64 tank, data on the operation of the engine “under load” is proposed to be obtained from the circuit of the EM-30 123 electromagnet or from the corresponding circuits of the D-20 sensors (Fig. 3).

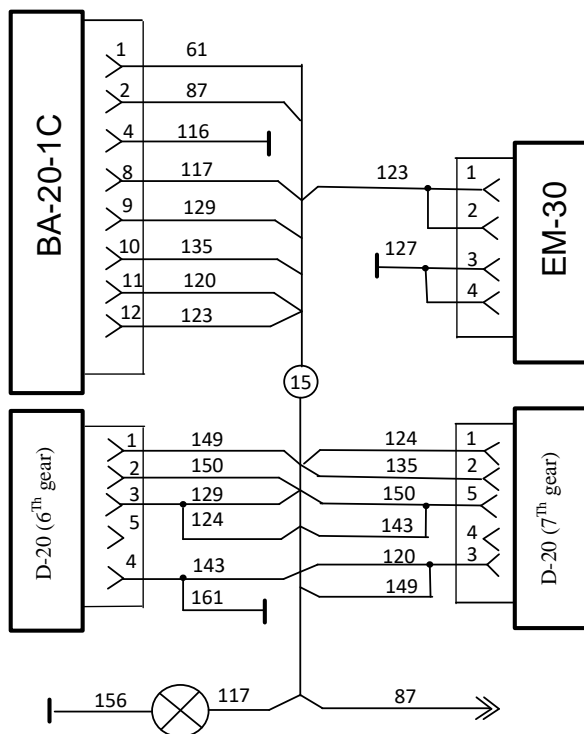


Fig. 3. Electrical diagram of the T-64 and T-72 tank rocker switch unit

The obtained values of coefficients $a_1=1.00001$; $a_2=1.125$; $a_3=1.7333$ provide accounting of engine operation at idling speed, normal operating speed and when working under load.

To differentiate the operation of the engine at idling speed, it is proposed to generate a fuel consumption signal. Such a signal can be, for example, an electrical signal from a fuel gauge sensor. In this case, it will be possible the “logical” combination of values using the rules of Boolean algebra and the installation of additional microprocessor equipment on the machine.

According to the authors, this will allow more accurate accounting of the machine's motor resource, avoiding “engine tarnishing”, etc.

In the simplified case, taking into account the possible option $a_1=1.00001$; accounting for m_2 (general) and m_3 (under load) is proposed.

$$MR(m) = 1.125m_{gen} + 1.7333m_{under\ load}. \quad (23)$$

Such realization will make it possible to use the regression equation (18) directly for the car crew [8, 9].

Conclusions

1. It is possible to make a conclusion about the nonlinear nature of the dependence of the engine life on time with different engine operation at different load modes.

Engine operating modes, which are determined by load resistance, are characterized by the number of revolutions of the engine crankshaft and the amount of power developed by the engine, largely determine its energy and economic performance of the engine and engine consumption.

2. The testing ground for the consumption of the motor resource of the machine, depending on the readings of the engine hours counter, can be formed on the basis of the data obtained from the results of the operation of the machine in different conditions

3. The analysis of the results of the research carried out that finding dependence of a 5Tdf engine motor resource can be presented as the sum of two regressions – linear and hyperbolic:

4. The readings of the engine hours counter will be recorded and further processed when the 5TDF engine is running in I-V and VI, VII gears, respectively.

Such realization will make it possible to use the regression equation directly for the car crew..

REFERENCES

1. Simson, A.E., Khomich, A.Z. and Kurits, A.A. (1980), *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines], Transport, Moscow, SU.
2. Ulanov, A. (2019), *Chasy tipa «budil'nik» ili pervoye izobretenie Kalashnikova* [Clock type “alarm clock” or the first invention of Kalashnikov], Kalashnikov MEDIA, [On-line]. – URL: <https://kalashnikov.media/article/technology/chasy-tipa-budilnik-ili-pervoe-izobretenie-kalashnikova>.
3. Goloschchapov, I. M. (1989), *Ekspluatatsiya bronetankovogo vooruzheniya i tekhniki* [Operation of armored weapons and equipment], Voennoye izdatel'stvo Ministerstva oborony SSSR, Moscow, SU.
4. Linnik, Yu.V. (1958), *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy* [The method of least squares and the foundations of the mathematical-statistical theory of processing observations], Fizmatgiz, Moscow, SU.
5. Aleksandrov, Ye., Aleksandrova, T., Kostianyk, I., & Morgun, Y. (2022), On the stability of the stabilized motion of a carrier rocket with a liquid-propellant jet engine and an onboard digital computer in the stabilization loop. *Advanced Information Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 26–32, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.05>.
6. Aleksandrov, Ye.Ye. and Aleksandrova, T.Ye. (2014), *Matematicheskoe modelirovanie, sistemnyy analiz i sintez dinamicheskikh system* [Mathematical modeling, systems analysis and synthesis of dynamic systems], NTU «KhPI», Kharkiv, 200 p.
7. Norman, R. Draper and Harry, Smith (2007), *Prikladnoy regressionnyy analiz* [Applied Regression Analysis], 3rd ed: Transl. from English, M., Williams, 2007, 912 p.

8. (1986), *Tank "Ural". Tekhnicheskoye opisaniye i instruktsiya po ekspluatatsii. (172M)*, Книга 2, Voennoye izdatel'stvo, Moscow, SU.
9. (1986), Ob'yekt 447A (437A). *Tekhnicheskoye opisaniye i instruktsiya po ekspluatatsii*, Книга 2, Voennoye izdatel'stvo Ministerstva obrony SSSR, Moscow, SU.

Received (Надійшла) 14.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Макогон Олена Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “ХПІ”, Харків, Україна;
Helen Makogon – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “KhPI”, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: helmkg@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1112-8707>.
- Сірош Віталій Сергійович** – магістрант кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “ХПІ”, Харків, Україна;
Vitaliy Sirosh – Undergraduate Cadet of the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: sirosh_vitaliy@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-2178>.
- Губа Сергій Михайлович** – викладач кафедри підготовки офіцерів запасу, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “ХПІ”, Харків, Україна;
Serhiy Guba – Lecture of the Reserve officers training department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gsm136bts@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2304-2321>.
- Лаврут Олександр Олександрович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри тактики, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна;
Oleksandr Lavrut – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Tactics Department, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine;
e-mail: alexandrlavrut@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6723>.
- Загребельний Сергій Михайлович** – заступник начальника кафедри бронетанкового озброєння, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна;
Sergiy Zagrebelnyy – Deputy Head of the Armored weapons Department, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine;
e-mail: zagrebs_1@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9618-294X>.
- Рудий Андрій Володимирович** – кандидат технічних наук, викладач кафедри бронетанкового озброєння, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна;
Andriy Rudyi – Candidate of Technical Sciences, Lecturer of the Armored weapons Department, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine;
e-mail: rasty82@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2239-2925>.

Розробка методики оцінки витрати моторесурсу двигуна 5ТДФ за різних режимах роботи машини

О. А. Макогон, В. С. Сірош, С. М. Губа, О. О. Лаврут, С. М. Загребельний, А. В. Рудий

Анотація. Предметом вивчення в статті є облік моторесурсу двигуна танка 5ТДФ на різних режимах роботи. **Метою статті** є розробка методики оцінки витрат моторесурсу двигуна 5ТДФ при різних режимах експлуатації машини. **Завдання дослідження:** на основі аналізу даних про режими роботи двигуна 5ТДФ визначити безліч параметрів, що дають емпіричні та аналітичні оцінки витрат моторесурсу машини; запропонувати аналітичні оцінки витрат моторесурсу двигуна 5ТДФ від кількості відпрацьованих мотогодин при різних режимах експлуатації машини; запропонувати механізм розрахунку числових значень, виходячи з результатів їх статистичної обробки даних експлуатації машини; проаналізувати конструктивні можливості практичної реалізації розробленої методики з огляду на наявні контрольно-вимірювальні прилади, встановлені на зразку Т-64Б. Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. **Отримані наступні результати:** Визначена безперервна функціональна залежність фактичної кількості годин роботи двигуна від значень лічильника за годину на різних швидкостях, що дозволить більш ретельно вести облік витрати двигуна, але передбачатиме розробку спеціальних приладів на основі сучасної елементної бази. **Висновки.** Можна зробити висновок про нелінійний характер залежності ресурсу двигуна від часу при роботі двигуна на різних режимах навантаження. Режими роботи ДВС, що визначаються опором навантажень, характеризуються числом обертів колінчастого валу і величиною потужності, що розвивається двигуном, значною мірою визначають енергетичні та економічні показники двигуна та витрату його ресурсу. Полігон значень для дослідження витрати моторесурсу машини в залежності від показань лічильника мотогодин може бути сформований на основі даних, отриманих за результатами роботи машини в різних умовах. Аналіз результатів проведених досліджень показав, що знахідну залежність моторесурсу двигуна 5ТДФ можна представити у вигляді суми двох регресій – лінійної та гіперболічної. Показання лічильника мотогодин будуть записуватися і оброблятися, коли двигун 5ТДФ працює на I-V і VI, VII передачах відповідно. Така реалізація дасть можливість використовувати рівняння регресії безпосередньо для екіпажу танка.

Ключові слова: витрата моторесурсу двигуна 5ТДФ; рівняння регресії; метод найменших квадратів; облік показників лічильника мотогодин в танку.

Intelligent information systems

UDC 004.891.3

DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.09>

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

TEMPORAL-ORIENTED MODEL OF CAUSAL RELATIONSHIP FOR CONSTRUCTING EXPLANATIONS FOR DECISION-MAKING PROCESS

Abstract. The **subject** of research in the article is the decision-making process in intelligent systems. The goal is to develop a model of the causal relationship between the states of the decision-making process in an intelligent information system, taking into account the temporal aspect of this process, in order to build cause-and-effect relationships between the actions of the process and further use these dependencies to form explanations for the sequence of actions to obtain a decision. The formation of causal relations between the states of the decision-making process makes it possible to substantiate the sequence of actions of this process, considering incomplete information regarding external influences on this process. **Tasks:** structuring the decision-making process in an intelligent information system as a specialized business process; development of a three-element model of the causal relationship between the states of the decision-making process, considering the temporal aspect of this process; substantiation of the possibility of using three-element relationships to build causal dependencies for decision making in intelligent systems. **The approaches used are:** the set-theoretical approach used to describe the elements of the decision-making process in intelligent systems; a logical approach that provides a representation of the relationship between the states of the decision-making process; probabilistic approach to describe the probabilistic component of the decision-making process. The following **results** are obtained. The decision-making process in an intelligent information system was structured as a specialized business process that, using additional information from the user, turns the input data into a result that is valuable for this user; a three-element model of the causal relationship between the states of the decision-making process is proposed, which makes it possible to take into account external influences on the process; using a probabilistic approach, the possibility of using three-element causal relations to describe the decision-making process in intelligent systems is substantiated, taking into account uncontrolled external influences. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows. A three-element model of the causal relationship between the states of the decision-making process is proposed, based on a model of a temporal rule of the "future" type, containing a state-cause, a state-effect and an intermediate state that reflects external influences. The model makes it possible to build a base of cause-and-effect dependencies for the decision-making process in an intelligent information system, considering external influences and use these dependencies to build explanations for this process.

Keywords: intellectual system; explanation; decision-making process; temporality; causality.

Introduction

The decision-making process in intelligent systems today, as a rule, is based on the use of complex, "non-transparent" for the user computational intelligence algorithms. The use of such algorithms does not always allow the user to establish causal relationships between input data, external influences and the decision obtained by the information system. As a result, the user's confidence in the received decision may decrease [1]. This makes it difficult to use such a solution in practice. In order to solve this problem, the user should receive an explanation of the decision process [2, 3]. Such an explanation is based on the use of a chain of causal dependencies. The latter establish a cause-and-effect relationship between the input data and the resulting decision, considering current external influences [4, 5].

The explanation can be a component of the decision-making process, and can also be used as a supplement to this process [6]. In the first case, the decision-making algorithm should provide for the formation of cause-and-effect dependencies. The advantage of this approach is that the explanation can contain complete information about the decision-making process.

The disadvantage of the approach is that it complicates the implementation of the decision-making process in an intelligent system.

In the second case, the explanation is constructed in parallel with the decision-making process based on data on the actions of the process and its state. This approach makes it possible to supplement the existing intelligent systems with the possibilities of explaining the obtained solutions.

For example, supplement recommendations in e-commerce systems with explanations. However, such an "external" explanation does not always have full access to data regarding the state of the decision-making process and external or internal events that affect the sequence of actions of the process. Therefore, the problem of forming causal relations for constructing an explanation is relevant. The latter represent knowledge about the decision-making process in conditions of incomplete information about external and internal influences on this process.

Existing approaches to the construction of explanations regarding the sequence of decision-making in intelligent systems were formed within the framework of the Explainable Artificial Intelligence program [7]. One approach is to formulate explanations based on causal relationships. Such dependencies can be obtained as statistical regularities, formalized to predict the results of external influences [8], and also generalized to construct explanations [9, 10].

The decision-making process has a temporal aspect and therefore statistical regularities can be represented in

the form of weighted temporal rules [11, 12]. These rules specify the order in time for pairs of states of the decision-making process [13, 14]. Dependencies can be specified for successive states (next-rules), as well as for states between which there are intermediate states (future-rules).

These intermediate states reflect changes in the course of the decision-making process, which arise as a result of additional external or internal influences. The weight of temporal rules determines their importance. The weight of each rule is set taking into account the probability of execution of alternative implementations of the decision-making process that use this rule [15]. However, within the framework of the temporal approach, causal relationships are considered insufficiently [16].

Existing approaches to the selection of causal dependencies are based on the use of a probabilistic dis-separation approach both for individual variables and for structured entities [8].

However, such approaches determine statistical regularities [17]. It is not assumed that the probability distribution of the values of the relevant variables can change over time.

Thus, the combination of probabilistic and temporal approaches makes it possible to build causal relationships that can be used to explain the decision-making process in an intelligent information system. This problem needs its solution.

The aim of the article is to develop a model of the causal relationship between the states of the decision-making process in an intelligent information system, taking into account the temporal aspect of this process in order to build cause-and-effect dependencies between the actions of the process and subsequently use these dependencies to form explanations about the sequence of actions with receiving a decision.

The formation of causal relationships between states of the decision-making process makes it possible to justify the sequence of actions of this process, taking into account incomplete information about external influences on this process.

To achieve this goal the following tasks are solved:
– structuring of the decision-making process in the intellectual information system as a specialized business process;

– development of a three-element model of the causal relationship between states of the decision-making process, taking into account the temporal aspect of this process;

– justification of the possibility of using three-element relations to build causal dependencies for the decision-making process in intelligent systems.

Structuring the decision-making process

The decision-making process in an intelligent system as an object of research has a number of properties that are essential for building causal relationships that explain the sequence of reaching the resulting decision. We highlight the following key properties of this process, which make it possible to determine probabilistic causal relationships between the states of the information system:

– the decision-making process of a given technology transforms input data into an output that is of value to the user;

– the decision-making process provides a result in interaction with the user, that is, this process has executors;

– information about the execution of the process is recorded in the form of a sequence of events reflecting the sequence of execution of its actions.

Thus, this process has inputs, outputs, contains an algorithm for obtaining a result and uses information resources provided by the user. The decision-making process, taking into account these characteristics, can be presented in the form of a graph that displays possible sequences of actions to achieve the result. Such a graph contains one or more initial vertices, which reflect the receipt of input (input) data sets, the final vertex, which reflects the fact of obtaining the result.

The key elements of this process are presented in the Table 1.

Table 1 – Elements of the decision-making process

Element	Properties	Use in the construction of causal dependencies
Input	The data sets that define the resulting solution; for example, in the recommender subsystem, records about the choice of goods and services by users are used as input data	They set the initial state of the decision-making process and make it possible to represent this process as a generalized cause-and-effect relationship "input data - resulting decision"
Output	The resulting decision; for example, a recommendation to the user on the selection of goods or services in the e-commerce system	Sets the final state of the decision-making process and makes it possible to build a causal relationship with the maximum degree of generalization "input data - resulting decision"
Sequence of actions	Contains alternative options for obtaining a solution and can be represented by a directed acyclic graph; each of the alternative options for obtaining a decision is given by a path on the graph of the decision-making process.	Makes it possible to determine causal relationships between the actions of the decision-making process, which are true for several alternative options for performing such a process
Resource	Additional data provided by the user in the process of forming a decision; for example, information about the user's navigation through the pages of the e-commerce site.	Such additional data are not always available when determining causal dependencies in the decision-making process, as they are the result of external influence from the user of the intelligent system

In conclusion, the decision-making process has algorithmic and probabilistic components. The algorithmic component sets the sequence of decision-making actions for different options of input data, as well as data received from the user. The algorithmic component can be displayed in the form of a directed acyclic graph.

The probabilistic component reflects external and internal influences on the decision-making process as a result of, for example, the actions of the user of the intelligent system. The probability component specifies a specific path along the process graph depending on the user's actions.

An important characteristic of this process is that it should provide a useful solution for the user, taking into account both algorithmic and probabilistic components.

In general, the decision-making process has features of a business process, which makes it possible to use the concept of building a process model based on its logs to determine causal dependencies that determine cause-and-effect relationships between the actions of this process. The process model in this case is presented in the form of a directed acyclic graph.

The log contains records about the sequence of process events, i.e. about the implemented paths around the process graph. Each sequence of events reflects the process of forming a decision under relevant external influences.

That is, different user actions lead to different options for implementing such a process.

Accordingly, the process log contains traces of possible alternative options for its execution. Each trace consists of a sequence of events. Each of the events is a reflection of a certain action of the process. That is, it is appropriate to consider the event as a "snapshot" of the state of the decision-making process in the intellectual system. Therefore, the task of building causal relationships between the actions of the decision-making process can be transformed into the task of identifying cause-and-effect relationships between the states of this process.

It should be noted that the log usually does not contain a complete description of the process states, which does not make it possible to build deterministic dependencies between states. Therefore, when forming causal dependencies, it is necessary to take into account the probabilistic aspect.

That is, the choice of one of the log traces is determined by external or internal influence. External influences are set by the user. Internal influence is a probabilistic generalization of incomplete information regarding the decision-making process.

For example, a process model does not contain all intermediate states.

Temporal-oriented model of causal relationship

The process combines several sequences of states

$$S_i = \langle s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,|S_i|} \rangle.$$

Such sequences may reflect the same causal relationship y_n^j between j and n – states of the decision-making process.

For example, joint dependence y_3^1 , for pairs of states $\langle s_{1,1}, s_{1,3} \rangle$ from the sequence S_1 and $\langle s_{2,1}, s_{2,3} \rangle$ from the sequence S_2 .

The difference between these sequences arises as a result of the influences θ_1 and θ_2 , which arise as a result of interaction with the user in the process of obtaining a decision.

Sequences of process S_i execution states are ordered in time. The temporal aspect of each state $s_{i,j}$ is recorded in the log in the form of time stamps $t_{i,j}$. That is, the condition is fulfilled for each pair of states $\langle s_{i,j}, s_{i,n} \rangle$:

$$\left(\forall \langle s_{i,j}, s_{i,n} \rangle \right) t_{i,j} < t_{i,n}, \quad (1)$$

where $t_{i,j}, t_{i,n}$ – the instants of time when the states $s_{i,j}, s_{i,n}$ occur, respectively.

Thus, on the set of sequences

$$S = \{S_i\}$$

there are temporal dependencies r_n^j that express ordered by time pairs of states $s_{i,j}, s_{i,n}$ on one or multiple sequences S_i .

A set of such rules represents temporal knowledge about decision-making processes. The use of weighted rules r_n^j makes it possible to form new sequences of states and order the obtained sequences according to the probability of their use.

The temporal approach cannot be used to construct explanations, since temporal relationships between process states do not always reflect causal dependencies between these states.

For example, a user's choice of a certain product in an e-commerce system over time is not always related to a change in his preferences or product properties. Such a choice can be, for example, the result of fulfilling another person's order.

In this example, the sequence of product selection is displayed with the help of a temporal dependence r_2^1 : the selection of product 2 after the selection of product 1. At the same time, the presence of dependence r_2^1 does not indicate the existence of causal dependence y_2^1 , which reflects a cause-and-effect relationship between the choice of goods. In this case, there is an unforeseen external influence (execution of an order from another user).

Information about this influence is absent in the description of the decision-making process (in particular, it is not recorded in the log of this process).

Therefore, when moving from temporal knowledge to causal dependencies, it is necessary to take into account possible external influences and responses to changes in the sequences of states of the decision-making process in the intelligent information system.

The problem in this case is the lack of information about external influences. However, we can take into consideration the consequences of such influences under conditions of the existance at least one intermediate state $s_{i,m}$ between states $s_{i,j}, s_{i,n}$, so the temporal rule r_n^j set the following sequense of states:

$$r_n^j = \left\{ \langle s_{i,j}, s_{i,m}, s_{i,n} \rangle : \right. \\ \left. (\forall i) t_{i,j} < t_{i,m} < t_{i,n}, \right. \quad (2)$$

Such a rule r_n^j is a type of temporal rule of the "future" type [13]. In the general case, for a temporal rule of this type, there can be an arbitrary number of intermediate states between the initial and final states $s_{i,m}$.

This work is devoted to the detection of causal relationships based on temporal rules, so we will consider only a simple version of the rule connecting three states. Future - a rule with several intermediate states can be represented as a combination of several temporal rules with three elements.

Each of the sequences of three states will be considered as a model of the causal relationship $y_{i,n}^{i,j}$ on the path S_i provided that the last state $s_{i,n}$ depends only on the two previous ones.

That is, if the probability of its occurrence $P(s_{i,n})$ is a function of the probabilities of occurrence of previous states:

$$y_{i,n}^{i,j} = \langle s_{i,j}, s_{i,m}, s_{i,n} \rangle \Big| P(s_{i,n}) = F(P(s_{i,j}), P(s_{i,m})), \quad (3)$$

where

$$P(s_{i,j}), P(s_{i,m}) -$$

probabilities of occurrence of conditions $s_{i,j}, s_{i,m}$ on the sequence S_i .

We substantiate the possibility of constructing a causal relationship (3) in conditions of incomplete information regarding external influences on the process of decision formation in an intelligent system.

The probability of this relationship depends on the probability of uncontrolled influence $P(\theta_i)$, as well as on the probability of successive occurrence of states $s_{i,j}, s_{i,m}, s_{i,n}$ on the sequences S_i :

$$P(y_{i,n}^{i,j}) = \sum_{i:\forall S_i \exists y_{i,m}^{i,j}} \left(P(\theta_i | \exists \theta_i) P(s_{i,m} | \exists s_{i,j} : t_{i,m} > t_{i,j}) \right)^* \quad (4) \\ * P(s_{i,n} | \exists s_{i,m} : t_{i,n} > t_{i,m}).$$

Since the intermediate state $s_{i,m}$ makes it possible to represent the future rule as two consecutive next rules [13].

We know the results of the first rule, so we will consider the uncontrolled external influence within the framework of the second rule, during the transition $\langle s_{i,m}, s_{i,n} \rangle$:

$$P(y_{i,n}^{i,j}) = P(s_{i,m} | \exists s_{i,j} : t_{i,m} > t_{i,j})^* \\ \sum_{i:\forall S_i \exists y_{i,m}^{i,j}} \left(P(\theta_i | \exists \theta_i) P(s_{i,n} | \exists s_{i,m} : t_{i,n} > t_{i,m}) \right). \quad (5)$$

In expression (5), we take into account the transition probabilities $\langle s_{i,m}, s_{i,n} \rangle$ for all possible influences θ_i , that is, on all trajectories known from the log along the directed acyclic graph of the decision-making process.

Therefore, the probability of dependence $P(y_{i,n}^{i,j})$ can be calculated as follows:

$$P(y_{i,n}^{i,j}) = P(s_{i,m} | \exists s_{i,j} : t_{i,m} > t_{i,j}) P(s_{i,n} | \exists s_{i,m} : t_{i,n} > t_{i,m}) \quad (6) \\ \Big| \forall S_i \exists y_{i,n}^{i,j}.$$

According to expression (6), the three-element relationship $y_{i,n}^{i,j}$ is a causal relationship, since the probability of the resulting state $s_{i,n}$ depends only on the probability of the occurrence of two previous states $s_{i,j}, s_{i,m}$ and does not depend on the probability of uncontrolled influences.

Each state $s_{i,j}, s_{i,m}, s_{i,n}$ according to approach which was introduced in [5] is given by the set of the property values.

Such properties can reflect the objects with which the decision-making process operates, as well as the actions of this process.

Therefore, model (3) specifies a causal relationship between states that are described by heterogeneous variables. The distribution of variables differs. Also, the distribution may change over time [18].

Conclusions

The structuring of the decision-making process in the intelligent information system as a specialized business process, which, with the use of additional information from the user, transforms input data into a result that is valuable for this user.

The sequence of works of this process is represented by a time-ordered directed acyclic graph, each vertex of which reflects the state of the decision-making process after the corresponding action is performed.

The process graph combines possible variants of its implementation taking into account external influences from the user. The given structuring makes it possible to

identify causal relationships between states of the decision-making process taking into account external influences based on existing temporal dependencies for pairs of states. Such temporal dependencies determine the ordering of process states in time, but do not always reflect the cause-and-effect relationships between states that arise as a result of the implementation of process actions.

A three-element model of the causal relationship between states of the decision-making process, based on the model of a temporal rule of the "future" type, is proposed.

The model contains a time-ordered sequence of three states. The first of the states reflects the cause, and the last - the effect.

The intermediate state makes it possible to take into account additional external influences, information about which is missing in the description of the decision-making process.

The proposed causal relationship model makes it possible to establish cause-and-effect relationships

between states of the decision-making process on the basis of temporal relations between these states. Such relationships can later be combined into causal dependencies reflecting the connections between the actions of the decision-making process and used to build explanations in intelligent information systems.

The possibility of using three-element relationships to build causal dependencies for the decision-making process in intelligent systems is substantiated. The elements of the relation are the sequence of states of the decision-making process.

It is shown that this relationship makes it possible to take into account unknown external influences on the decision-making process.

That is, the probability of reaching the final state depends on the probability of the first and intermediate states of this process.

Thus, the proposed approach makes it possible to establish cause-and-effect relationships between the actions of the decision-making process in conditions of incomplete information regarding this process.

REFERENCES

- Castelvecchi D. (2016), "Can we open the black box of AI?" *Nature*, Vol. 538 (7623), pp. 20-23, doi: <https://doi.org/10.1038/538020a>.
- Miller T. (2019), "Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences", *Artificial Intelligence*, vol. 267, pp.1-38, doi: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>.
- Tintarev N., Masthoff J. (2012), "Evaluating the effectiveness of explanations for recommender systems", *User Model User-Adap Inter.*, Vol. 22, pp. 399–439, doi: <https://doi.org/10.1007/s11257-011-9117-5>.
- Chalyi, S., Leshchynskiy, V. and Leshchynska I. (2021), "Counterfactual temporal model of causal relationships for constructing explanations in intelligent systems [Контрфактуальна темпоральна модель причинно-наслідкових зв'язків для побудови пояснень в інтелектуальних системах]", *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. Системний аналіз, управління та інформаційні технології [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. System analysis, control and information technology]* : coll. of science Ave., No. 2 (6), National Technical University "KhPI", Kharkiv, pp. 41-46, doi: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2021.02.07>.
- Chalyi, S., Leshchynskiy, V. and Leshchynska I. (2021), "Relational-Temporal Model Of Set Of Substances Of Subject Area For The Process Of Solution Formation In Intellectual Information Systems [Реляційно-темпоральна модель набору сутностей предметної області для процесу формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі]", *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. Системний аналіз, управління та інформаційні технології [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. System analysis, control and information technology]* : coll. of science Ave., No. 1 (7), National Technical University "KhPI", Kharkiv, pp. 84-89, doi: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.01.14>.
- Adadi, A. and Berrada, M. (2018), "Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI)", *IEEE Access*, Vol. 6, 16 September 2018, INSPEC Accession Number: 18158981, pp. 52138-52160, Electronic ISSN: 2169-3536, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052>.
- Gunning, D. and Aha, D. (2019), "DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program", *AI Magazine*, Vol. 40(2), pp. 44-58, doi: <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i2.2850>.
- Maier, M., Marazopoulou, K. and Jensen, D. (2014), "Reasoning about Independence in Probabilistic Models of Relational Data", arXiv : 1302.4381, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1302.4381>.
- Pearl, J (2009), *Causality: Models, Reasoning and Inference*, 2nd ed. Cambridge University Press, September 14, 2009, USA, 484 p.
- Halpern, J. Y. and Pearl, J. (2005), "Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations." *The British Journal for the Philosophy of Science*, arXiv:cs/0208034, revised 19 Nov 2005, Vol. 56 (4). pp. 889-911, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0208034>.
- Levykin, V., and Chala, O. (2018), "Support decision-making in information control systems using the temporal knowledge base", *Advanced Information Systems [Сучасні інформаційні системи]*, Vol. 2, No. 4, pp. 101–107, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.4.17>.
- Levykin, V. and Chala, O.(2018), "Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5/3(95), pp. 16-24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142664>
- Chala, O. (2018), "Models of temporal dependencies for a probabilistic knowledge base", *Econtechmod*, An International Quarterly Journal, Vol. 7, No. 3, pp. 53 – 58.

14. Chala, O. (2020), "Model of generalized representation of temporal knowledge for tasks of support of administrative decisions [Модель узагальненого представлення темпоральних знань для задач підтримки управлінських рішень]", *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. Системний аналіз, управління та інформаційні технології* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. System analysis, control and information technology] : coll. of science Ave., No. 1 (3), National Technical University "KhPI", Kharkiv, pp. 14-18, doi: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.01.03>.
15. Chala, O. (2019), "Development of information technology for the automated construction and expansion of the temporal knowledge base in the tasks of supporting management decisions", *Technology audit and production reserves*, Vol. 1/2(45), pp. 9-14, doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.160205>.
16. Chalys, S., & Leshchynskiy, V. (2020), "Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems", *Advanced Information Systems [Сучасні інформаційні системи]*, Vol. 4, No. 3, pp. 113–117, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.16>
17. Marazopoulou, Katerina, Maier, Marc, and Jensen, David (2015), "Learning the structure of causal models with relational and temporal dependence", *Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, 12 July 2015, pp. 572–581.
18. Chalys S., Leshchynskiy V. and Leshchynska I. (2019), "Modeling explanations for the recommended list of items based on the temporal dimension of user choice", *Control, navigation and communication systems [Системи управління навігації та зв'язку]*, Vol. 6 (58), pp. 97-101. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.6.097>.

Received (Надійшла) 29.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Serhii Chalys – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Professor of Information Control Systems Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: serhii.chalys@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9982-9091>.

Лещинський Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Volodymyr Leshchynskiy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: volodymyr.leshchynskiy@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8690-5702>.

Темпорально-орієнтована модель каузального відношення для побудови пояснень щодо процесу прийняття рішення

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський

Анотація. Предметом вивчення в статті є процес прийняття рішення в інтелектуальних системах. Метою є розробка моделі каузального відношення між станами процесу прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі з урахуванням темпорального аспекту даного процесу з тим, щоб побудувати причинно-наслідкові залежності між діями процесу та в подальшому використати ці залежності для формування пояснень щодо послідовності дій з отримання рішення. Формування каузальних відношень між станами процесу прийняття рішення дає можливість обґрунтувати послідовність дій даного процесу з урахуванням неповної інформації щодо зовнішніх впливів на даний процес. **Завдання:** структуризація процесу прийняття рішень в інтелектуальній інформаційній системі як спеціалізованого бізнес-процесу; розробка трьохелементної моделі каузального відношення між станами процесу прийняття рішення з урахуванням темпорального аспекту даного процесу; обґрунтування можливості використання трьохелементних відношень для побудови каузальних залежностей для процесу прийняття рішення в інтелектуальних системах. Використовуваними **підходами** є: теоретико-множинний підхід, який застосовується для опису елементів процесу прийняття рішення в інтелектуальних системах; логічний підхід, який забезпечує представлення відношень між станами процесу прийняття рішення; ймовірнісний підхід для опису ймовірнісної складової процесу прийняття рішення. Отримані наступні **результати**. Виконано структуризацію процесу прийняття рішень в інтелектуальній інформаційній системі як спеціалізованого бізнес-процесу, який, з використанням додаткової інформації від користувача, перетворює вхідні дані у результат, що становлять цінність для цього користувача; запропоновано трьохелементну модель каузального відношення між станами процесу прийняття рішення, що дає можливість врахувати зовнішні впливи на процес; з використанням ймовірнісного підходу обґрунтовано можливість використання трьохелементних каузальних відношень для опису процесу прийняття рішення в інтелектуальних системах з урахуванням неконтрольованих зовнішніх впливів. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано трьохелементну модель каузального відношення між станами процесу прийняття рішення, що базується на моделі темпорального правила типу «future», містить стан-причину, стан-наслідок та проміжний стан, що відображає зовнішні впливи. Модель дає можливість побудувати базу причинно-наслідкових залежностей для процесу прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі з урахуванням зовнішніх впливів та використати ці залежності для побудови пояснень щодо даного процесу.

Ключові слова: інтелектуальна система; пояснення; процес прийняття рішення; темпоральність; причинно-наслідковий зв'язок.

Methods of information systems protection

UDC 004. 75

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.10>Bogdan Tomashevsky¹, Serhii Yevseiev², Serhii Pohasii², Stanislav Milevskiy²¹Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine²National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

MECHANISMS FOR ENSURING THE SECURITY OF CHANNELS OF A PROSPECTIVE MANAGEMENT SYSTEM

Abstract. The development of military (state) control systems in modern conditions of hybrid warfare requires the possibility of rapid expansion of both functionality and scaling of the physical and logical basis of management, increasing the range of digitization and use of both military and civilian communication channels to manage troops and weapons. Not only the computing power of the enemy, the means of suppressing and / or blocking the communication channels of the control system, but also the development of quantum technologies that place new and more stringent requirements on security mechanisms based on symmetric and asymmetric cryptography algorithms. According to NIST, a full-scale quantum computer breaks both symmetric and asymmetric cryptosystems in polynomial time, significantly reducing their resilience. The paper proposes mechanisms of post-quantum cryptography, which allow to ensure the stability of not only communication channels, but also elements of the structure of the control system. The basis of post-quantum encryption algorithms is the combination of algorithms (schemes) of crypto-code structures with cryptosystems on unprofitable codes (multi-channel cryptography), as well as the possibility of combining them with digital steganography methods. This approach provides the ability to hide elements of management commands, and the use of different channels provides the ability to hide individual elements of cryptograms.

Keywords: crypto-code constructions; algebraic geometric codes⁴ LDPC-codes; troop control system; quantum period.

Introduction

The control system of troops and weapons is one of the main elements of the infrastructure of the Armed Forces, which allows to perform a variety of functions, from timely delivery of combat signals in the vertical subordination of combat units, to logistics and technical functions. The share of cyber threats is growing and this trend will intensify with the development of information technologies and their convergence with artificial intelligence technologies in the next decade. The growth of such influence on the functioning of both national and transnational governance structures creates a new security situation. There is a division of spheres of influence in cyberspace between the world's centers of power, and their desire to ensure the realization of their own geopolitical interests is growing [1]. In the conditions of hybrid war, stricter requirements are set for the functionality of a promising system of joint leadership and military management based on [2]:

- digitalization of activities and introduction of modern information technologies, including electronic communications, in the field of defense;

- digital transformation of the activity of the Ministry of Defense of Ukraine, the General Staff of the Armed Forces of Ukraine, other bodies of military management of the Armed Forces of Ukraine and governing bodies of other components of the Defense Forces;

- construction of the Joint Defense Network, which will be based on the electronic communication network and information systems of the Ministry of Defense of Ukraine and the Armed Forces of Ukraine;

- creation and development of operations networks based on modern digital means, by which field communication system of the Armed Forces of Ukraine will be re-equipped, development of new (improvement

of existing) combat control systems. The formation of a promising system of joint leadership and military management requires the use of fundamentally new approaches to structural elements, security protocols not only in terms of hybrid warfare, but also possible cyber-attacks by cybercriminals, their integration with social engineering, synergies and hybridity.

Analysis of recent research and publications [1–7] identifies the need to create an automated system of defense components, which should comply with NATO standards, doctrines and recommendations at all levels of control (tactical, operational and strategic) with certain specifics of basic capabilities [7]. In addition, the NIST of the United States has conducted research [3, 8–10], which calls into question the stability of modern symmetric and asymmetric cryptosystems with the advent of a full-scale quantum computer. In addition, the Shore algorithm allows to factorize the number N over time $O(\lg^3 N)$, using $O(\lg N)$ bit register, which is significantly faster than any classical method of factorization. The advantages of using quantum registers are significant memory savings (N quantum bits can contain 2^N bits of information), the interaction between qubits allows for one operation to affect the entire register (quantum parallelism) [3, 8–11]. Table 1 shows the results of a comparative analysis of the complexity of factorization for classical and quantum algorithms, table 2 – the complexity of the implementation of the Shore method of discrete logarithm of a group of points EC [3, 8–11]. These results indicate a significant reduction in computing resources when using a full-scale computer, which significantly reduces the efficiency of modern algorithms for symmetric and asymmetric cryptography to provide security services.

Table 2 shows the results of the analysis of the complexity of the implementation of the Shore method of discrete logarithm of a group of EC points [3, 8–11].

Table 1 – Comparative analysis of the complexity of factorization for classical and quantum algorithms

Module size N, bit	The number of required qubits $2n$	The complexity of the quantum algorithm $4n^3$	The complexity of the classical algorithm
512	1024	$0.54 \cdot 10^9$	$1.6 \cdot 10^{19}$
3072	6144	$12 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{41}$
15360	30720	$1.5 \cdot 10^{13}$	$9.2 \cdot 10^{80}$

Table 2 – The complexity of the implementation of the Shore method of discrete logarithm of a group of EC points

Algorithm for calculating a discrete logarithmic equation			
The size of the order of the base point, bits	The number of required qubits $f(n)=7n+4\log_2 n+10$	The complexity of the quantum algorithm $360n^3$	The complexity of the classical algorithm
163	1210	$1.6 \cdot 10^9$	$3.4 \cdot 10^{24}$
256	1834	$6 \cdot 10^9$	$3.4 \cdot 10^{38}$
571	4016	$6.7 \cdot 10^{10}$	$8.8 \cdot 10^{85}$
1024	7218	$3.8 \cdot 10^{11}$	$1.3 \cdot 10^{154}$

In the conditions of post-quantum cryptography, NIST experts suggest considering special attacks (SIDE-CHANNEL ATTACKS). The implementation of these attacks is aimed at finding vulnerabilities in the practical implementation of the cryptosystem, primarily in the means of cryptographic protection [3, 8–11].

The possibility of using quantum technology by the enemy and/or cybercriminals to hack the command and control system of troops and weapons is questionable to ensure cryptographic stability of cryptograms, which are based on modern algorithms of symmetric and asymmetric cryptography. This requires in the post-quantum period to significantly increase the length of key messages [8], as well as to use post-quantum cryptographic algorithms, among which one of the most promising are algorithms of crypto-code constructs McEliece, based on algebraic geometry or LDPC codes (Low Density Parity Code).

The aim and objectives of the study. The aim of the work is to study the mechanisms of ensuring the security of the channels of a promising system of joint leadership and military management based on post-quantum algorithms. To achieve the aim of the work it is necessary to solve the following tasks:

- analysis of construction of McEliece crypto-code constructions on algebraic geometric codes and/or unprofitable codes;
- construction of Niederreiter crypto-code constructions on LDPC and/or unprofitable codes;
- assessment of the stability of the proposed crypto-code structures.

Analysis of McEliece crypto-code constructions on algebraic geometric codes and/or loss-making codes

The main advantage of crypto-code constructions is the integrated combination of symmetric encryption –

speed of crypto-transformations, and asymmetric encryption – providing cryptographic stability based on a theoretically complex problem – decoding random code, as well as building crypto-code constructions (CCC) based on interference methods. coding provides the ability to correct errors, which, in turn, allows you to use a data transfer approach with direct error correction. However, a significant drawback is the complexity of their practical implementation in the GF alphabet ($2^{10}-2^{13}$), as well as significant energy costs. In addition, [12] proposed a practical algorithm for breaking these structures using cyclic noise-tolerant codes, the essence of which is to find the elements of the generating matrix and remove the effect of masking matrices. The orthogonality of the matrices – generating and testing – allows to consider the effectiveness of the attack on the Niederreiter scheme. Promising direction of elimination of the revealed regularities in [12] suggests to use cascade or algebrogeometric codes – codes constructed on the basis of algebra of the theory of noise-tolerant coding and geometrical parameters of a curve, in particular elliptic curves.

The formation of the crypto-code structure of McEliece is shown in fig. 1. Let G be a generating matrix of linear (n, k, d) code over $GF(q)$ with polynomial decoding complexity, X be a nondegenerate $k \times k$ -matrix over $GF(q)$, D be a diagonal matrix with non-zero diagonal elements, P is an adjustable matrix of size $n \times n$. The permutable matrix implements the permutation of the coordinates of the vector in the form of matrix multiplication, namely, the element p_{ij} of the matrix P is equal to 1 if and only if the coordinate with the number i passes by permutation into the coordinate with the number j . In other cases $p_{ij} = 0$. Thus, the matrix P contains only one unit in each column and in each row. The product of the matrices $L = P \times D$ specifies the permutable matrix L with nonzero elements of the field $GF(q)$. The permutable matrix L (unipotent matrix) when rearranging the coordinates of the vector preserves the Heming distance, i.e. $d(a, b) = d(a \times L, b \times L)$, where $d(x, y)$ is the Heming distance between the vectors x and y [11–14].

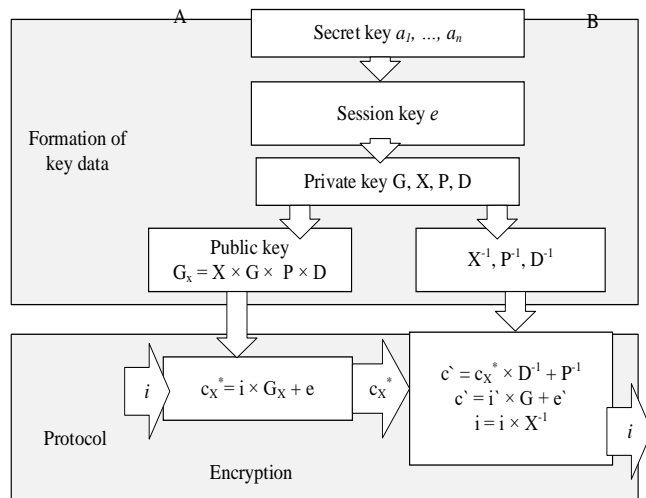


Fig. 1. Data exchange protocol using the McEliece CCC on the EC

The public key in an asymmetric cryptosystem based on McEliece CCC is the generating matrix $G_X = X \times G \times P \times D$, obtained by multiplying the linear generation matrix (n, k, d) code on $GF(q)$ on the masking matrix (X, P, D) , personal (private) key are matrices X, P, D . Closed information (codogram) is a vector of length n and is calculated as a rule

$$c_X^* = i \times G_X + e, \quad (1)$$

where vector $c_X = i \times G_X$ belongs to (n, k, d) code with a generating matrix G_X ; i – k -bit information vector; vector e – secret weight error vector ℓt (session secret key).

The general scheme of algebraic geometric coding was first proposed in [12]. Let C – class divisors on X degree α . Then C sets the display $\phi: X \rightarrow P^m$, set of generator functions $y_i = \phi(x_i)$ specifies the algebraic geometry code of length $n \leq N$.

Code characteristics (n, k, d) related by ratio $k + d \geq n - g + 1$. If $2g - 2 < \alpha \leq n$, then the code is related to the characteristics $(n, \alpha - g + 1, d), d \geq n - \alpha$.

The code dual to it is also algebraic with characteristics $(n, n - \alpha + g - 1, d_\perp), d_\perp \geq \alpha - 2g + 2$. Set the McEliece CCC based on elliptical codes as follows [11]. Let G^{EC} – generating matrix for elliptical (n, k, d) code on $GF(q)$ of view:

$$G^{EC} = \begin{pmatrix} F_0(P_0) & F_0(P_1) & \dots & F_0(P_{n-1}) \\ F_1(P_0) & F_1(P_1) & \dots & F_1(P_{n-1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{k-1}(P_0) & F_{k-1}(P_1) & \dots & F_{k-1}(P_{n-1}) \end{pmatrix} = \left\| F_j(P_i) \right\|_{n,k} \quad (2)$$

and dimension $k'n, k = a, a = 3 \times \text{deg}F$.

Let X – nondegenerate $k'k$ -matrix on $GF(q)$, D – diagonal matrix with non-zero diagonal elements, P – permutable matrix size $n'n$. Define an asymmetric McEliece CCC with an elliptical code: public key matrix $G_X^{EC} = X \times G^{EC} \times P \times D$, personal (private) key – matrices X, P, D .

Closed information (codegram) is a vector of length n and is calculated according to the rule: $c_X^* = i \times G_X^{EC} + e$, where the vector belongs to the elliptical (n, k, d) code with a generating matrix G_X^{EC} , i – k -bit information vector, vector e – secret weight error vector ℓt . The formation of the Niederreiter crypto-code construction is shown in Fig. 2.

Let H – test matrix of linear (n, k, d) code on $GF(q)$ with polynomial decoding complexity. Let X – nondegenerate $r'r$ -matrix on $GF(q)$, D – діагональна матриця з ненульовими елементами на діагоналі, P – permutation matrix of size $n'n$. The public key in the Niederreiter scheme is the matrix $H_X = X \times H \times P \times D$, the personal (private) key is the masking matrices – X, P, D . Closed information (codegram) S_X is a syndrome-vector of length $r = n - k$ and is calculated according to the rule:

$$S_X = e \times H_X^T, \quad (3)$$

where vector e – vector of length n and weight ℓt , carrying confidential information (information message to be closed).

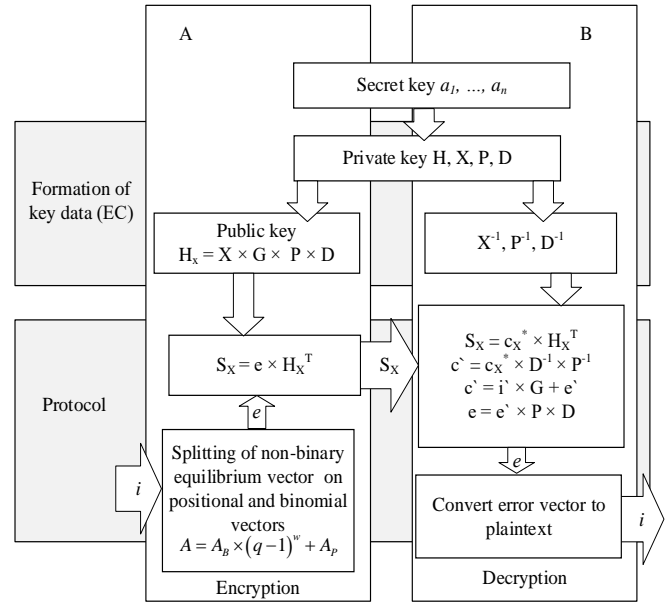


Fig. 2. Protocol of data exchange using Niederreiter CCC on the EC

To transmit non-binary symbols in [11], an algorithm for forming a non-binary equilibrium code sequence is proposed, which is schematically shown in Fig. 3.

The method of non-binary equilibrium coding on the basis of generalized binomial-positional representation allows to implement an asymmetric cryptosystem with Niederreiter CCC on the basis of algebraic geometric codes (AGC), which significantly enhances its statistical cryptographic stability and provide the necessary data reliability and efficiency.

In order to reduce the energy consumption of CCC, it is proposed to use modified elliptical codes - shortened and/or extended, which reduce the field strength to $GF(2^6-2^8)$, as well as maintain the required level of stability through the use of additional initialization vectors. To modify the elliptical code that does not reduce the minimum code distance, it is proposed to reduce the number of information symbols.

Let $I = (I_1, I_2, \dots, I_k)$ – information vector (n, k, d) of block code. Determine the subset h of information symbols, $h/n = x, x \leq 1/2k$. Place in the information vector I in the subset h zeros, ie $I_i = 0, \forall I_i \in h$. At other positions of vector I we will place information symbols.

When encoding the information vector, the characters of the set h are not used (they are zero) and can be discarded, and the resulting code word will be shorter by x code characters. To modify (shorten) elliptical codes, it is proposed to use reducing the set of curve points. Then shortened elliptical (n, k, d) code on $GF(q)$, built through the reflection of the view $\varphi: X \rightarrow P^{k-1}$, connected by characteristics $k + d \geq n$, moreover: $n = 2\sqrt{q} + q + 1 - x, k \geq \alpha - x, d \geq n - \alpha, \alpha = 3 \times \text{deg}F$.

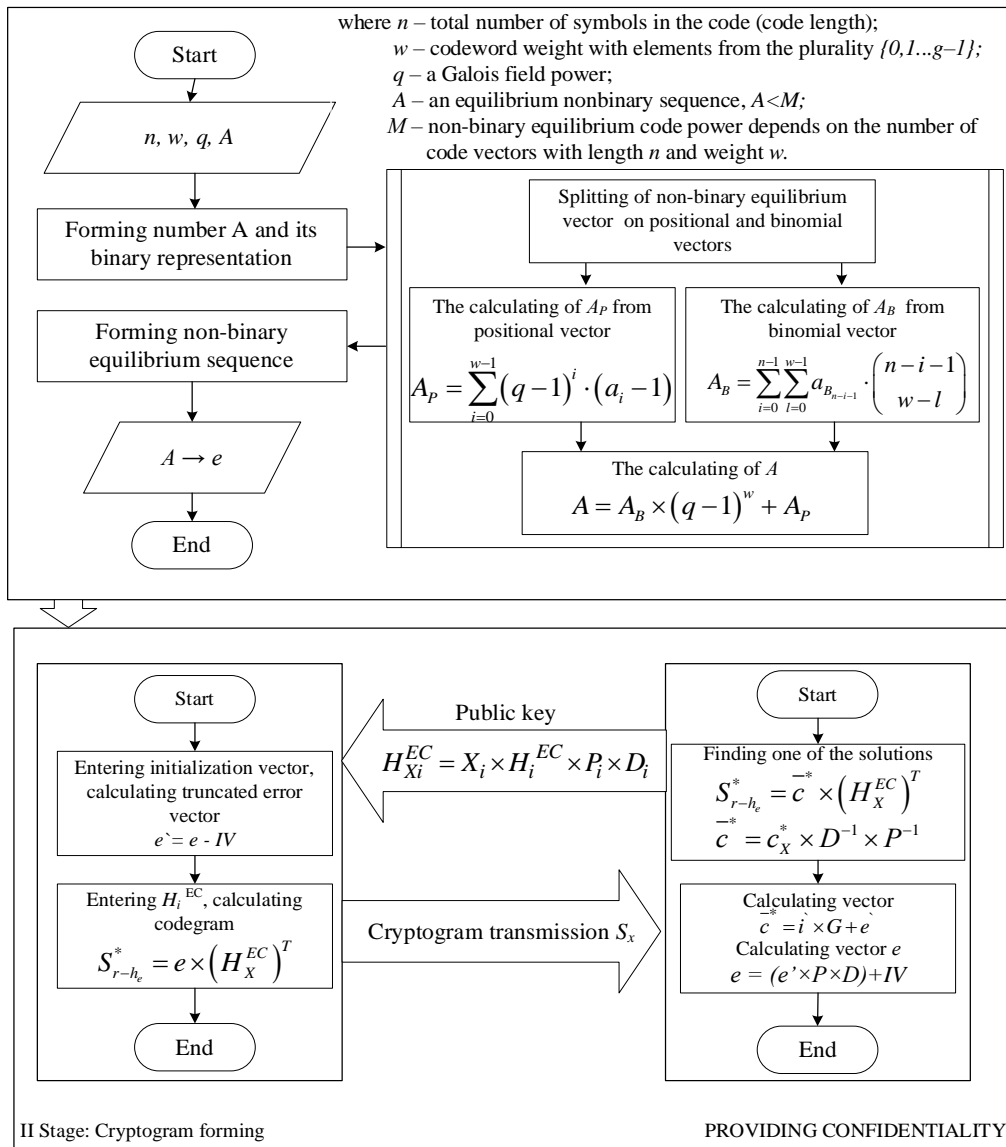


Fig. 3. Scheme of formation of code words of non-binary equilibrium code

Shortened elliptical (n, k, d) code on $GF(2^m)$, built through the reflection of the view $\varphi: X \rightarrow P^{k-1}$, determines the modified CCC (MCCC) on the modified elliptical codes (MEC) with parameters:

– secret key dimension:

$$l_{K+} = x \cdot \lceil \log_2 (2\sqrt{q} + q + 1) \rceil; \quad l_l = (\alpha - x) \cdot m; \quad (4)$$

– dimension of information vector (in bits):

$$l_l = (\alpha - x) \cdot m; \quad (5)$$

– dimension of the codegram:

$$l_s = (2\sqrt{q} + q + 1 - x) \cdot m; \quad (6)$$

– relative encoding rate:

$$R = (\alpha - x) / (2\sqrt{q} + q + 1 - x). \quad (7)$$

Fig. 4 shows the algorithm for forming a cryptogram/codogram. The decoding algorithm in the McEliece MCCC with shortened MES is shown in Fig. 5.

The second way to modify the linear block code, which maintains a minimum code distance and increases

the amount of transmitted data, is to lengthen its length after the formation of the initialization vector, by reducing the information symbols. Let $I = (I_1, I_2, \dots, I_k)$ – information vector (n, k, d) block code. Choose a subset h of information symbols, $|h| = x$, $x \leq 1/2 k$ and form the initialization vector. Place in the information vector I in the subset h zeros, ie $I_i = 0, \forall I_i \in h$. At other positions of vector I we will place information symbols. After that, we add information symbols in the position of the initialization vector. To modify (lengthen) the elliptical codes, we will use decreasing the set of curve points.

Parameters of extended by x_1 characters from $GF(q)$ elliptical code constructed through the mapping of the view $\varphi: (X \cup \mathcal{H}_1) \rightarrow P^{k-1}$, $n = 2\sqrt{q} + q + 1 - x + x_1$ will be connected by such relationships:

$$n = 2\sqrt{q} + q + 1 - x + x_1,$$

$$k \geq \alpha - x + x_1, \quad d \geq n - \alpha, \quad \alpha = 3 \times \deg F.$$

Elongated elliptical (n, k, d) code on $GF(2^m)$, built through the reflection of the view $\varphi: (X \cup \mathcal{H}_1) \rightarrow P^{k-1}$, determines the MCCC with parameters:

– secret key dimension (in bits):

$$l_{K+} = (x - x_1) \cdot \left\lceil \log_2 (2\sqrt{q} + q + 1) \right\rceil; \quad (8)$$

– dimension of information vector (in bits):

$$l_I = (\alpha - x + x_1) \cdot m; \quad (9)$$

– cryptogram dimension (in bits):

$$l_S = (2\sqrt{q} + q + 1 - x + x_1) \cdot m; \quad (10)$$

– relative baud rate:

$$R = (\alpha - x + x_1) / (2\sqrt{q} + q + 1 - x + x_1). \quad (11)$$

For Niederreiter CCC, an additional initialization vector is used to define codewords that satisfy the decoding algorithm. Fig. 6 and 7 show the protocol of exchange in an asymmetric cryptosystem based on Niederreiter CCC on extended and shortened MEC. The algorithm for forming a cryptogram in the modified Niederreiter CCC at MEC, taking into account the identified pattern, will be presented in the form of a sequence of steps [11, 16, 17]:

Step 1. Entering the information to be encoded, one of the elements of a set of suitable plaintexts. Public key input H_X^{EC} .

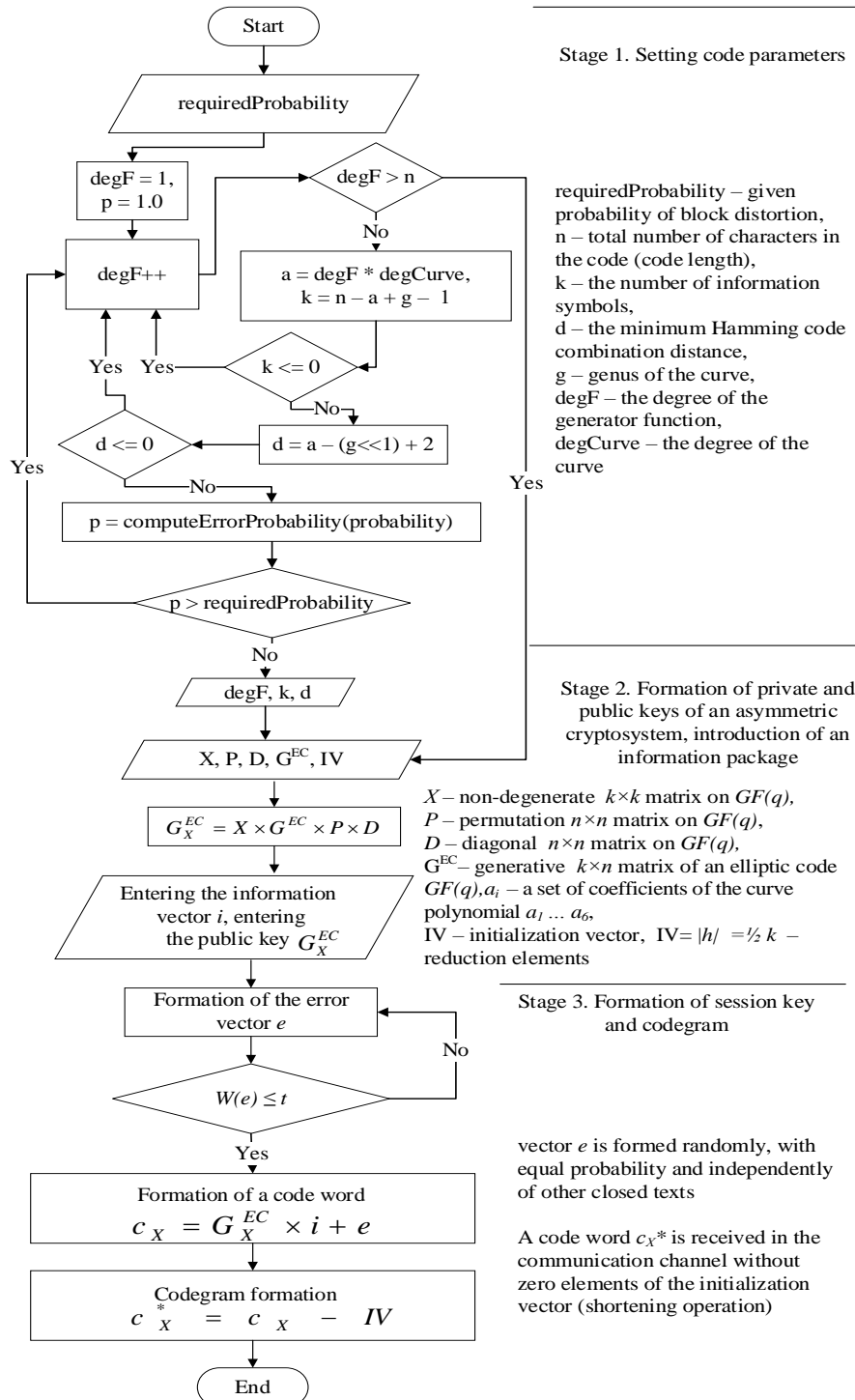


Fig. 4. Algorithm for forming a codogram in the McEliece MCCC with shortened MEC

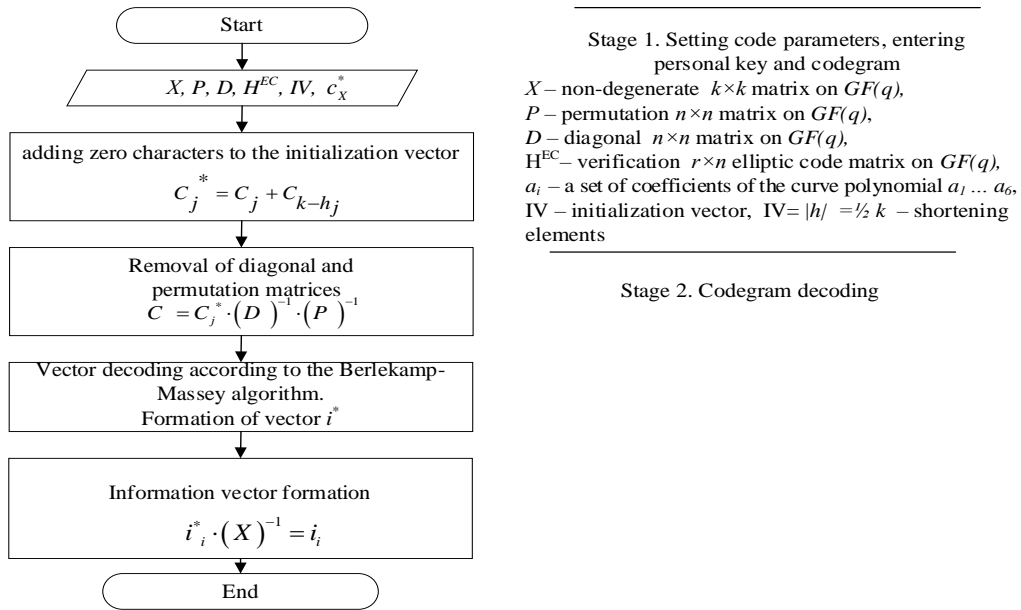


Fig. 5. Decoding algorithm in the McEliece MCCC with shortened MES

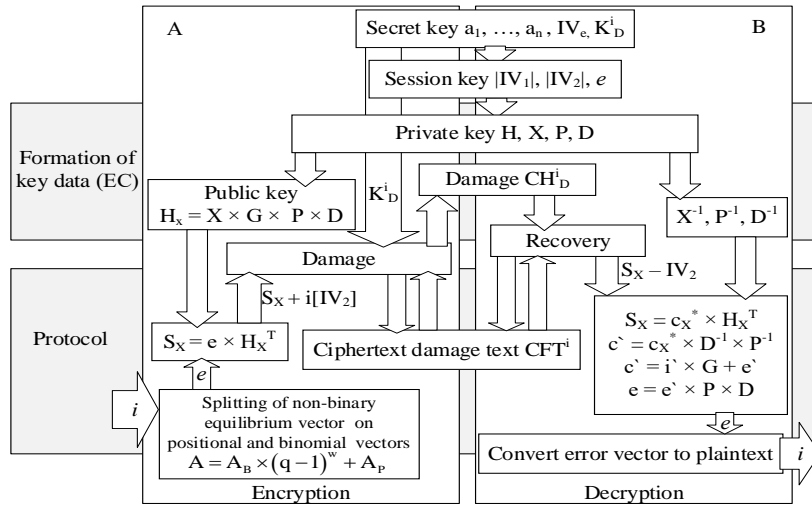


Fig. 6. Exchange protocol in an asymmetric cryptosystem based on Niederreiter CCC on extended MEC

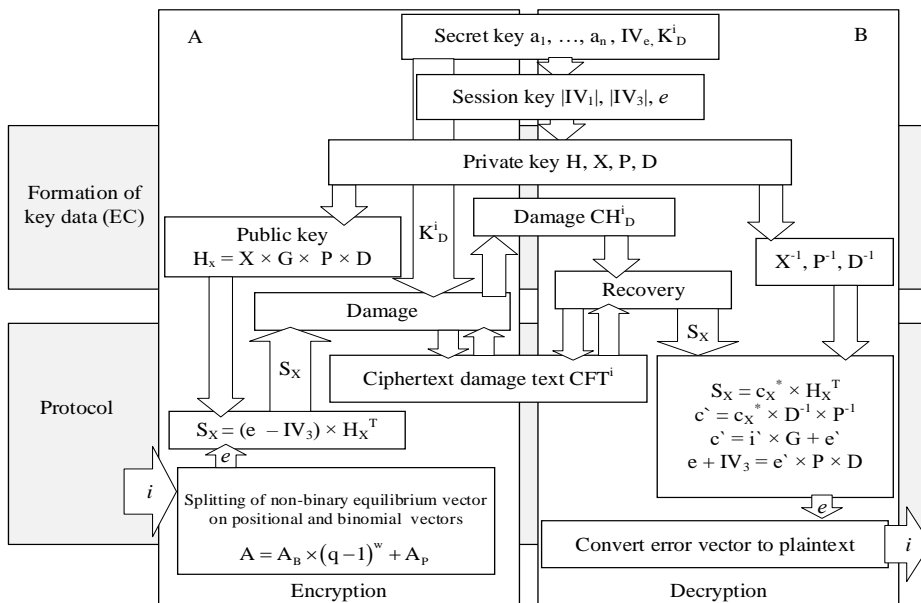


Fig. 7. Exchange protocol in an asymmetric cryptosystem based on Niederreiter CCC on shortened MEC

Step 2. Formation of an error vector e , the weight of which does not exceed $\mathcal{L}t$ (corrective ability of the elliptical code based on the algorithm of non-binary equilibrium coding).

Step 3. Formation of the initialization vector IV_1 .

Step 4. Formation of a shortened error vector: $e_x = e(A) - IV_2$.

Step 5. Codogram formation:

$$S_{r-h_e}^* = (e_n - h_e) \times H_X^{EC^T}.$$

The algorithm for decoding the codogram in the modified Niederreiter CCC on MEC will be written as a sequence of steps [11, 16, 17]:

Step 1. Input of the codogram S_x , which is decoding. Private key input – matrices X, P, D .

Step 2. Finding one of the possible solutions of the equation: $S_{r-h_e}^* = \bar{c}^* \times (H_X^{EC})^T$.

Step 3. Removal of diagonal and permutable matrices influence: $\bar{c}^* = c_X^* \cdot D^{-1} \cdot P^{-1}$.

Step 4. Decoding of the vector \bar{c}^* . Formation of the vector e_x' .

Step 5. Transformation of the vector e_x' : $e_x = e_x' \times P \times D$.

Step 6. Formation of the desired vector of error e : $e = e_x + IV_2$.

Step 7. Transformation of the vector e based on the use of non-binary equilibrium code into an information sequence.

To further reduce energy costs while maintaining the level of sustainability, it is proposed to create a hybrid McEliece, Niederreiter CCC (HCCC) with MEC based on the use of unprofitable codes. The theoretical basis for the construction of unprofitable texts is to remove the order of the symbols of the source text and, as a consequence, reduce the redundancy of language symbols in the unprofitable text. The amount of information expressing this order will be equal to the decrease in the entropy of the text compared to the

maximum possible value of entropy, the corresponding lack of order in the text in general, i.e., equally likely to appear any letter after any previous letter [18, 19]. Cryptographic unprofitable texts are texts obtained in the following ways [18, 19]: damage to the original text with subsequent encryption of unprofitable text and/or its losses, damage to ciphertext, damage to ciphertext of unprofitable text and/or ciphertext of losses.

Taking into account that the McEliece and Niederreiter CCC use the same approach to the formation of the private key (masking matrices are similar), and coding and decoding algorithms use the classical algorithms of noise-tolerant coding theory, it is proposed to use the approach to assessing the stability of HCCC, proposed in [11]. The overall stability of the proposed approach to the formation of HCCC consists of the stability of the modified cryptocode structure of Niederreiter and the stability of the multichannel cryptosystem on unprofitable codes. Universal mechanism of damage C_m can be described as:

$$\begin{aligned} CFT / CH_{FT} &= E_1(M, KU^{EC}), \\ CHD / CH_D &= E_2(M, KU^{EC}), \end{aligned} \quad (12)$$

$$M = E_{1,2}^{-1}(CFT / CH_{FT}, CHD / CH_D, KU^{EC}),$$

$$CFT / CH_{FT} = CFT / CH_{FT}^i, \dots, CFT / CH_{FT}^m,$$

$$KU^{EC} = \varphi(K_D^i, \dots, K_D^m, KU_1^{EC}, \dots, KU_m^{EC}),$$

$$CHD / CH_D = CHD / CH_D^i, \dots, CHD / CH_D^m$$

Thus, as a result we have two ciphertexts (loss (CH_D) and unprofitable text (FT_C)), each of which does not make sense either in the alphabet of the original text or in the alphabet of ciphertext. In fact, the ciphertext of the original message (M) is presented as a set of two unprofitable ciphertexts, each of which separately cannot recover the original text.

The main methods of damage are shown in Fig. 8 and Fig. 9. They reflect the basic protocols for providing security services based on the use of lossy codes.

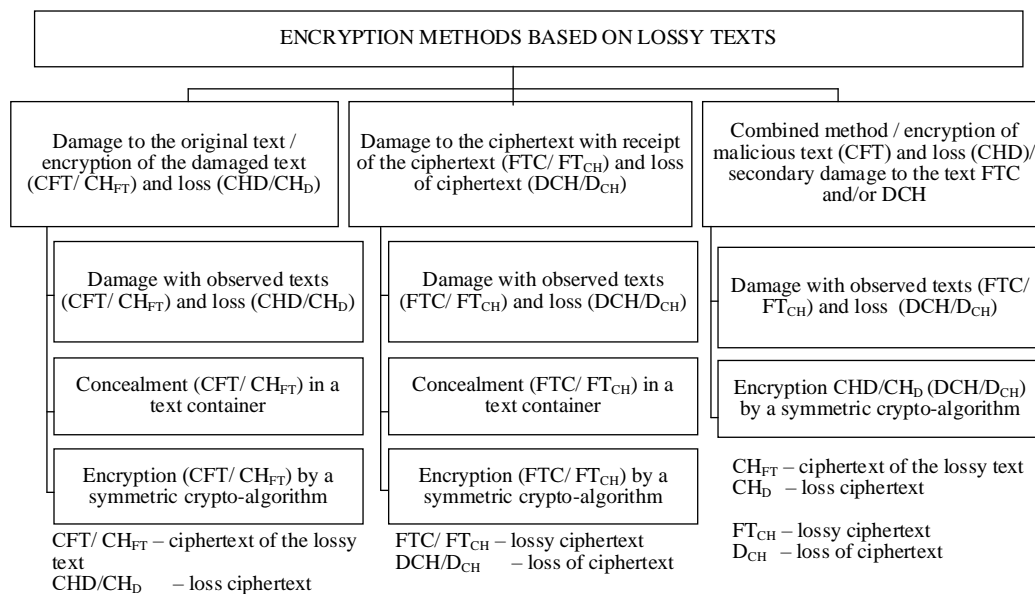


Fig. 8. The main methods of damage

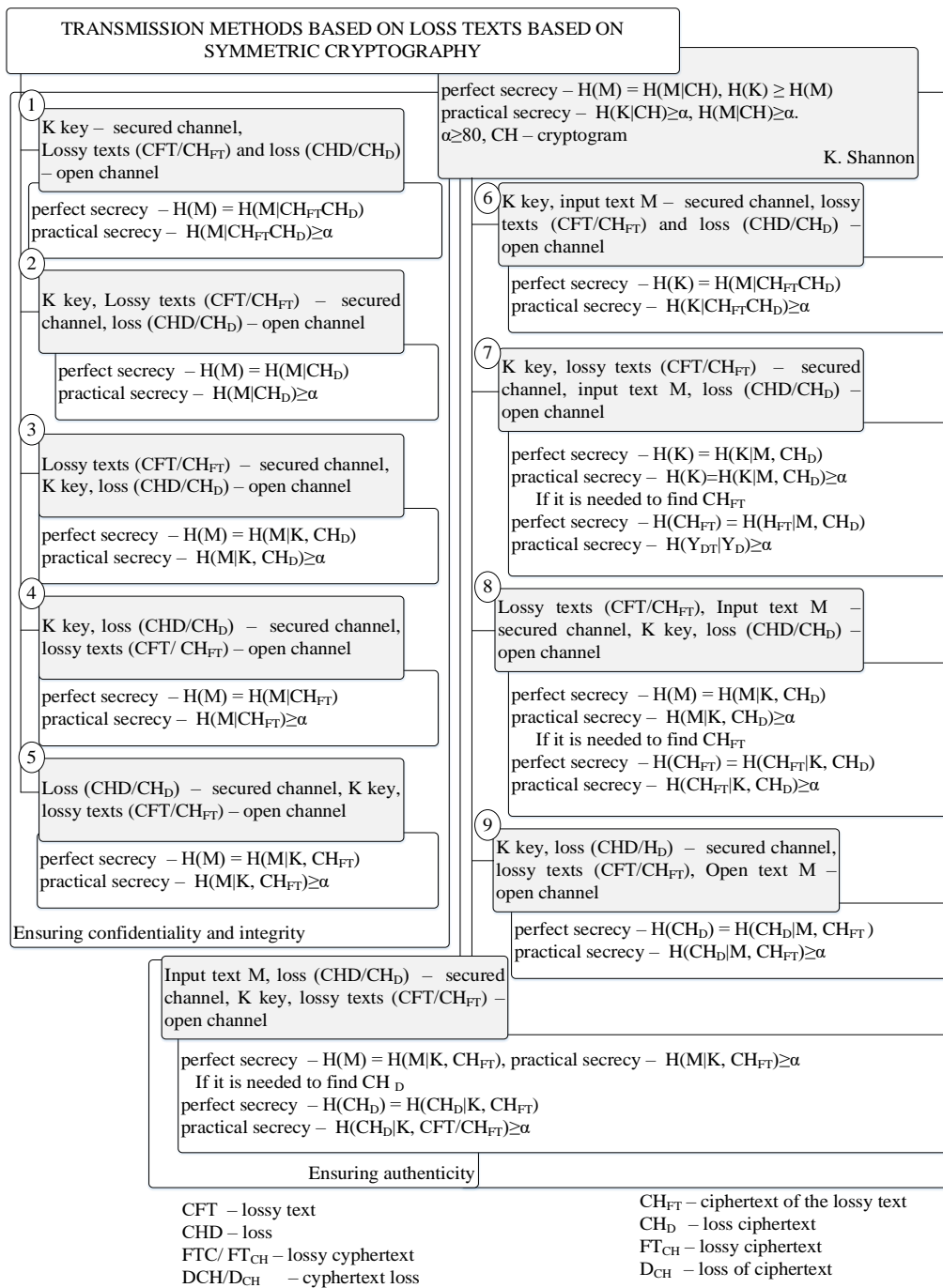


Fig. 9. Basic protocols for providing security services

The main advantage of the proposed methods and protocols for providing security services based on the use of lossy codes is the use not, and McEliece and Niederreiter MCCC on modified shortened or extended EC to ensure cryptocurrency and / or lossy text.

The unity distance for a random cipher model for which there is a probability to obtain meaningful text by randomly and equally probable selection of the key K and an attempt to decrypt the ciphertext when

$$N_S = H(K) \frac{2^{HL}}{|I|^L} = 1 \text{ is equal to:}$$

$$L = U_0 = \frac{H(K)}{\log |I| - H} = \frac{H(K)}{B \log |I|}, \quad (13)$$

where B – redundancy of the source text; H – entropy on the letter of the meaningful text in the input alphabet I , $|I| > 2$; 2^{HL} – the approximate value of the number of meaningful texts.

Thus, a necessary and sufficient condition for the loss of meaningless text is to reduce the code lengths of text characters beyond their redundancy. As a result, the unprofitable text has a length less than the length of the source text, and does not make sense of the source text [18, 19].

A quantitative measure of the effectiveness of the damage is the degree of destruction of the value equal to the difference between the entropy of the unprofitable text and the source text at different segments of the length of the unprofitable text:

$$d = H(FTC) - \sum_{i=1}^s H(M_i) p_i, \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^s p_i = 1, s = \lceil (L_0 - L_{FTC}) / L_{FTC} \rceil \quad (15)$$

where M_i – part of the source text corresponding to the i -th segment; p_i – its probability; L_0 – length M_i equal to the length of L_{FTC} – lossy text; s – number of segments.

Fig. 10 shows a universal mechanism of damage (algorithm MV2 (lossy text formation)).

The transformation definition set in the MV2 algorithm is a set $\{0, 1\}^n$ – consider as the power of the alphabet of a family of source texts, which is associated

with some probability distribution of the letters of this alphabet, and the symbols of the source text – the value of a discrete random element [18].

The main methods of damage are shown in Fig. 11–13. To determine the optimal method, we analyze the ratio of the number of required additional operations to implement the approach to the size of the resulting source data. The dependence of group operations of HCCC implementation on field strength is given in table 3. Table 4 shows the length of the transmitted data. The ratio of these values shows the bit rate of the bandwidth for each additional operation (Table 5).

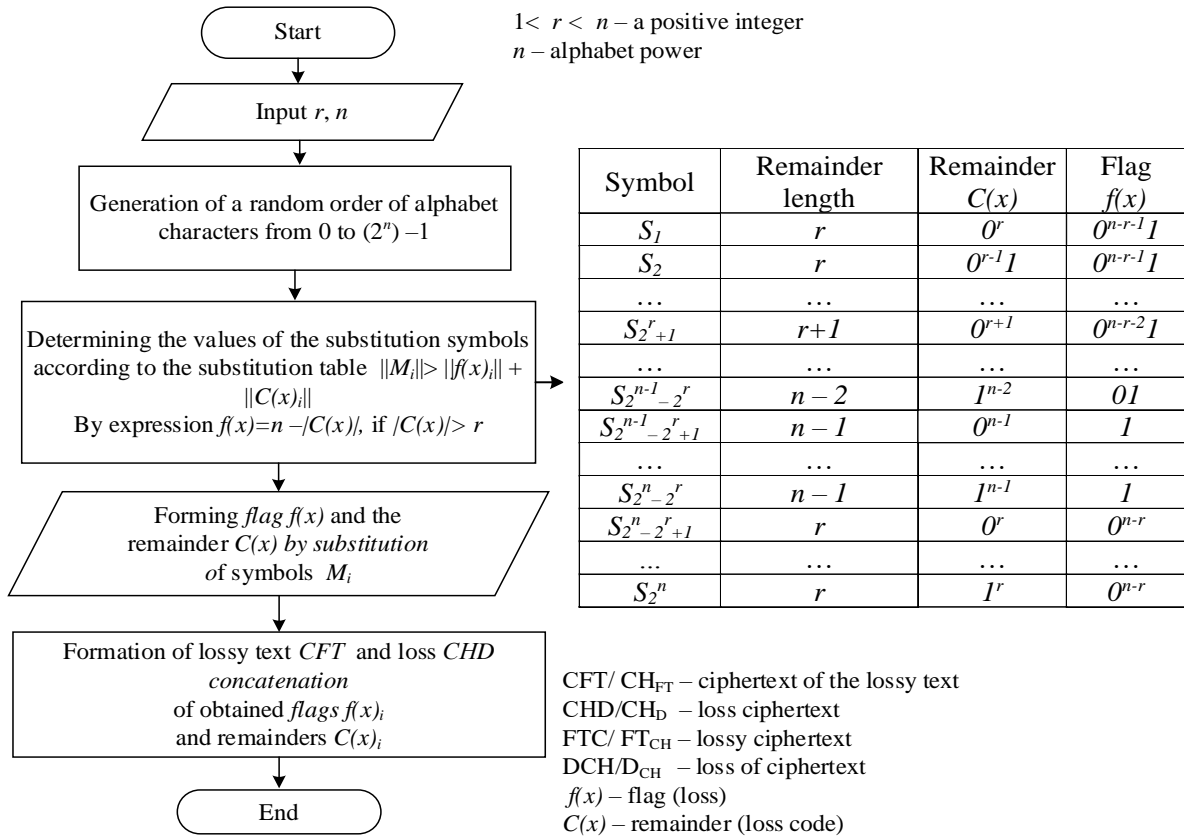


Fig. 10. Universal mechanism of damage - algorithm MV2

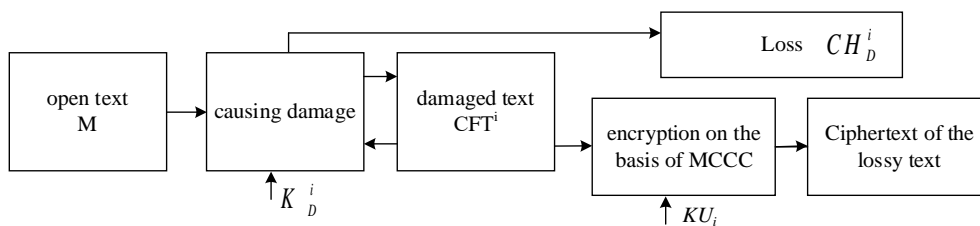


Fig. 11. Block diagram of a hybrid cryptosystem based on damage to the original text (approach 1)

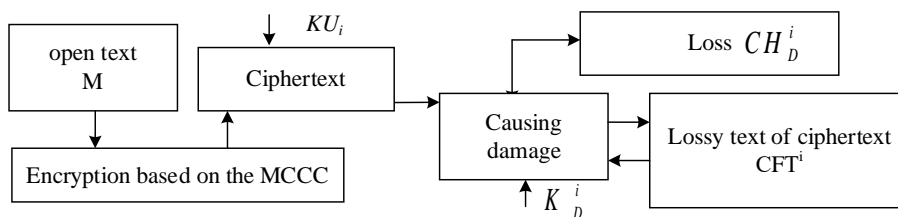


Fig. 12. Block diagram of a hybrid cryptosystem based on damage to ciphertext (approach 2)

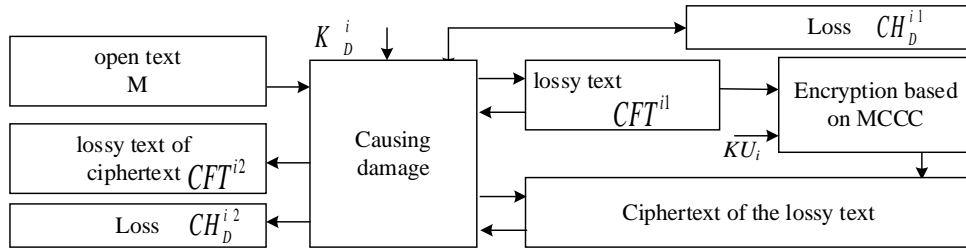


Fig. 13. Block diagram of a hybrid cryptosystem based on damage to the original text and ciphertext (approach 3)

Table 3 – Dependence of software implementation on field strength (number of thousands of additional operations before encryption / after / amount)

Approach	2 ⁵	2 ⁷	2 ⁹	2 ¹¹
1	1002/-/1002	3285/-/3285	6322/-/6322	11078/-/8247
2	-/1501/1501	-/4289/4289	-/9296/9296	-/15908/15908
3	992/1487/2479	2952/4428/7380	5793/8690/14483	10086/15130/25216

Table 4 – Length of transmitted data in bytes

Approach	2 ⁵	2 ⁷	2 ⁹	2 ¹¹
1	500902	902403	1642357	2374489
2	375298	667029	1072313	1652979
3	627533	1044069	1868102	2716713

Table 5 – Number of bits per additional operation

Approach	2 ⁵	2 ⁷	2 ⁹	2 ¹¹
1	2.5E-04	4.55E-04	4.812E-04	4.341E-04
2	4.999E-04	8.038E-04	10.836E-04	12.03E-04
3	4.938E-04	8.836E-04	9.691E-04	11.602E-04

Thus, the use of approach 3 in inflicting damage to ciphertext from the Niederreiter on MEC is shown in Fig. 7 increases the bandwidth in the field $GF(2^9)$. This method is the optimal approach for building a hybrid CCC.

The algorithm for forming a cryptogram in Niederreiter HCCC is shown in Fig. 14, 15:

Step 1. Entering information to be encoded. Entering a public key H_X^{EC} .

Step 2. Formation of the error vector e , the weight of which does not exceed ℓt – corrects the ability of MEC based on the algorithm of non-binary equilibrium coding [11].

Step 3. Formation of a shortened error vector: $e_x = e(A) - IV$

Step 4. Codogram formation:

$$S_{r-h_e}^* = (e_n - h_e) \times H_X^{EC^T}.$$

Step 5. Formation of unprofitable text (balance) and flag (loss):

$$E_{KMV2} : S_{r-h_e}^* \rightarrow \|f(x)_i\| + \|C(x)_i\|. \quad (16)$$

The codegram decoding algorithm in Niederreiter HCCC is shown in Fig. 16, 17:

Step 1. Obtaining meaningful text of the codegram based on the MV2 algorithm:

$$E_{KMV2}^{-1} : \|f(x)_i\| + \|C(x)_i\| \rightarrow S_{r-h_e}^*. \quad (17)$$

Step 2. Input of the S_X codegram to be decoded. Entering a private key – matrices X, P, D .

Step 3. Finding one of the possible solutions to the equation

$$S_{r-h_e}^* = \bar{c}^* \times (H_X^{MEC})^T. \quad (18)$$

Step 4. Removing the effect of diagonal and permutation matrices:

$$\bar{c}^* = c_X^* \cdot D^{-1} \cdot P^{-1}. \quad (19)$$

Step 5. Decoding of the vector \bar{c}^* . The formation of the vector e_x' .

Step 6. Transformation of the vector e_x' :

$$e_x = e_x' \times P \times D. \quad (20)$$

Step 7. Formation of the desired error vector e :

$$e = e_x + IV \quad (21)$$

Step 8. Transformation of the vector e based on the use of a non-binary equilibrium code into an information sequence.

Construction of Niederreiter's crypto-code constructions on LDPC and/or lossy codes

Low Density Parity Check (LDPC) codes are linear block codes whose check matrices in each column and each row have a small number of ones compared to the number of zeros in them [20–25].

To form the CCC on LDPC codes and/or lossy codes, we will use the approach of forming the H matrix, which is proposed in works [20–22].

A regular LDPC code with block length n is formed on the basis of the check matrix H , which is characterized

by a constant number of ones in a row W_r and a constant number of ones in the column W_c .

The verification matrix H has a low density of ones (the density of ones is considered low if the specific part of ones is less than 50% of all elements of the verification matrix).

Based on the given parameters n , W_r , W_c the corrective properties of the code t , bits are changed. At the same time, the position of the ones in the verification matrix H is formed on the basis of random permutations of the columns of the base submatrix, which contains only one one in each column.

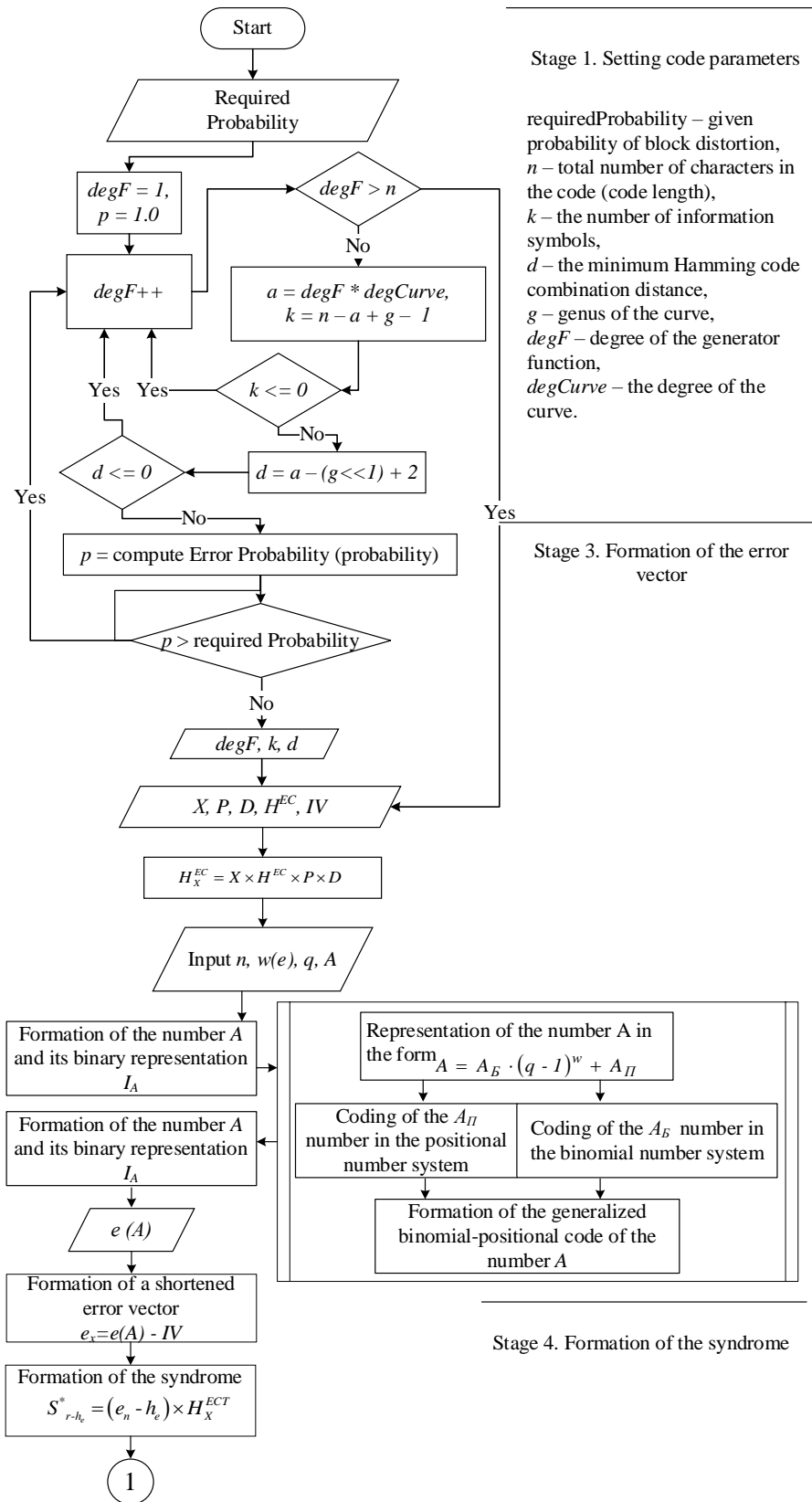


Fig. 14. Codegram formation in Niederreiter HCCC on MEC

At the same time, the speed of the regular LDPC code, depending on the parameters of the check matrix, is determined by the formula:

$$r_k = \frac{n - \left(\frac{n \cdot W_c / W_r -}{-(W_c - 1)} \right)}{n} = (22)$$

$$= 1 - \frac{W_c}{W_r} + \frac{W_c - 1}{n}.$$

At the same time, LDPC code H matrices of the same size and with the same parameters can generate codes with different code distance d and correction ability t . From this follows the task of finding the best verification matrix of the LDPC code with the given parameters n, W_r, W_c by the criterion of the maximum corrective capacity

$$t_{\max} \leq (d_{\max} - 2)/2.$$

The verification matrix of the LDPC code can be represented as:

$$H = \begin{bmatrix} H_1 / \pi_1(H_1) \\ \vdots / \pi_{W_c-1}(H_1) \end{bmatrix}, \quad (23)$$

where H_1 – base submatrix, $\pi_1(H_1)$ – submatrices obtained by randomly permuting the columns of the base submatrix $H_1, i = 1, 2, \dots, W_c - 1$.

The verification matrix H can be reduced to the form:

$$H = [A | I_{n-k}], \quad (24)$$

where A – some fixed $((n-k) \times k)$ – matrix with 0 and 1 (no longer sparse with ones), and I_{n-k} – a ones matrix of size $((n-k) \times (n-k))$.

The code word generation matrix G has the form:

$$G = [I_k | -A^T]. \quad (25)$$

If the matrix H is presented in the form (24), then the matrix G (25) is easily obtained from the matrix H by transformations using the Gaussian method [26, 27]. The code distance d for a regular LDPC code is defined as follows: d is equal to the smallest number of columns of the H matrix, which in sum give 0; d is equal to the smallest weight of a row (the number of ones in a row) of the matrix G .

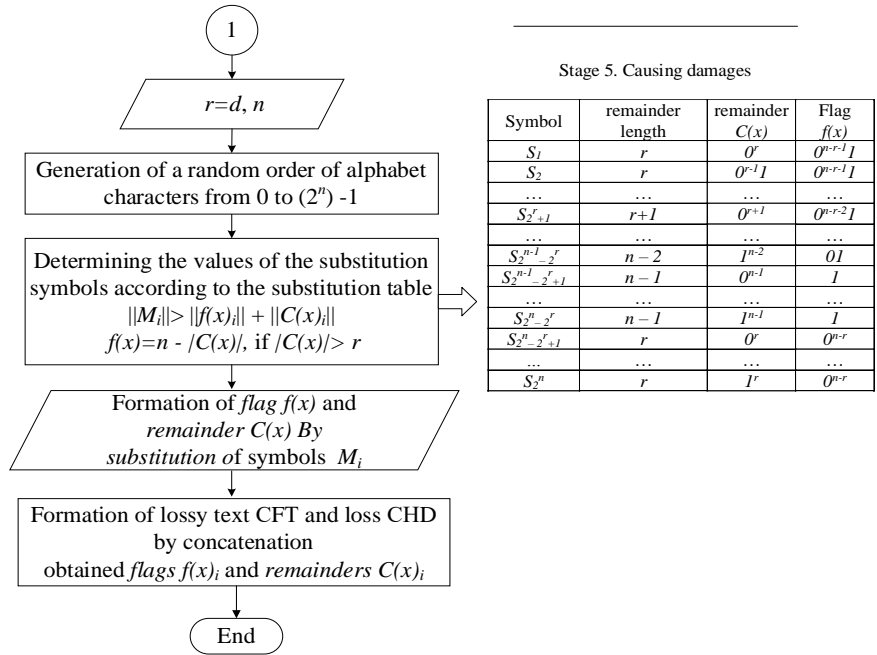


Fig. 15. Codegram formation in Niederreiter HCCC on MEC

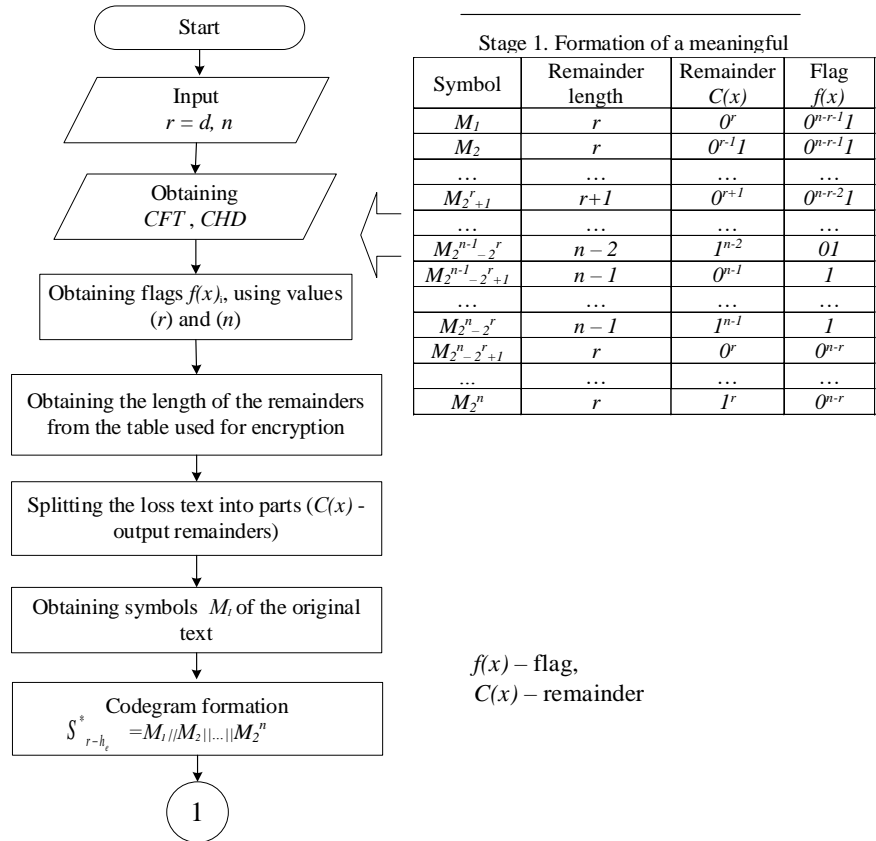


Fig. 16. Codegram decoding in Niederreiter HCCC on MEC

Use of these codes ensures compliance with the IEEE 802.16 standard. LDPC codes in the IEEE 802.16e standard are all represented by independent check matrices. For these verification matrices, there are a total of six basic matrices that's why 802.16e LDPC codes have strict structures and dimensions. Suppose the verification matrix H has size $m \times n$, where m is the number of parity checks and n – is the number of codeword coordinates. Thus, the code size (number of source symbols) $k = n - m$.

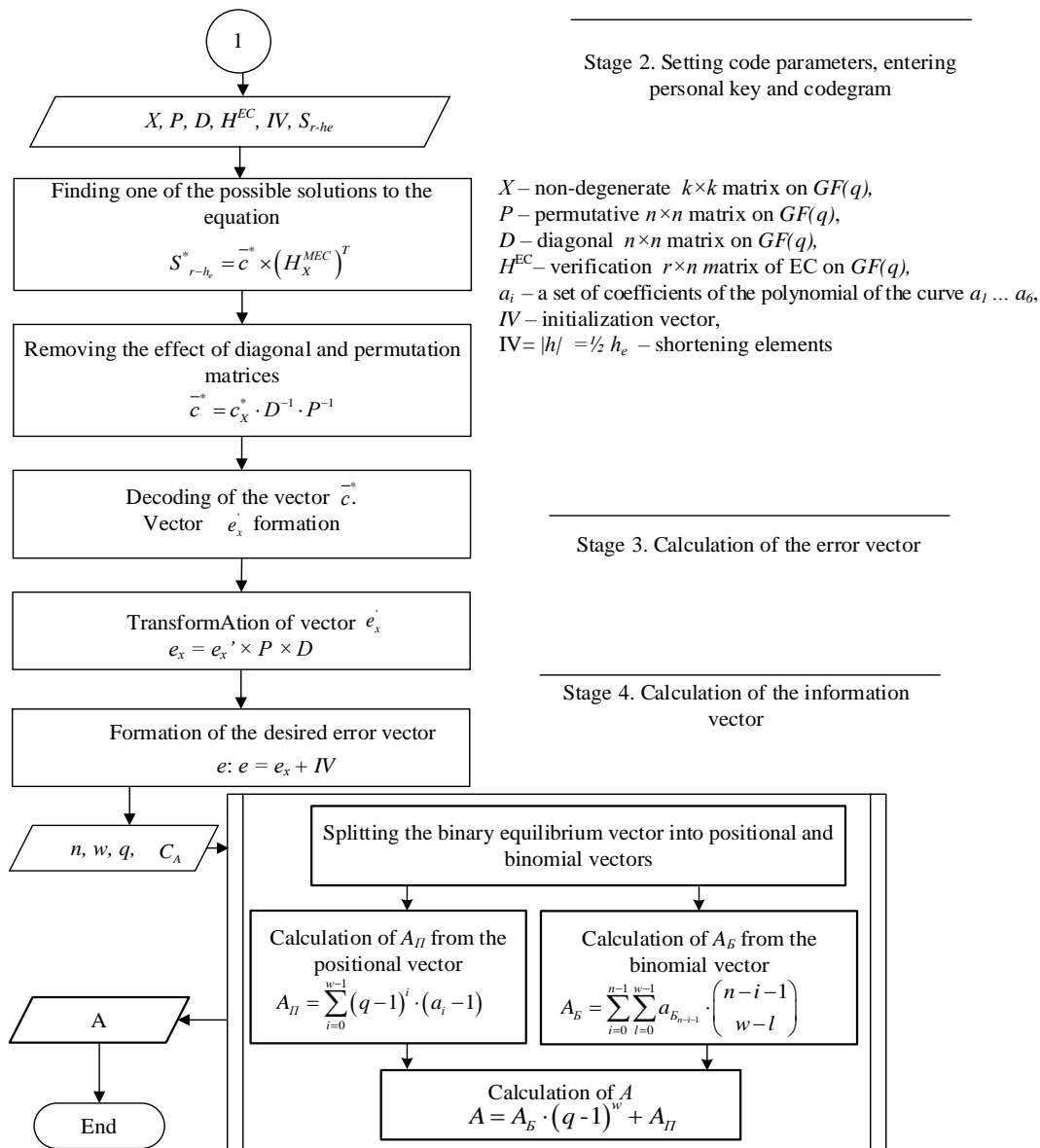


Fig. 17. Codegram decoding in Niederreiter HCCC on MEC

The check matrix is a combination of several $z \times z$ submatrices. Each submatrix or permutation is either a ones matrix or a zero matrix, so the base matrix simply needs to be a set of numbers that define the individual right-cycle shifts for the permutations. The size of the base matrix $m_b \times n_b$, where $m = zm_b$ and $n = zn_b$ (so we can determine $k = zk_b$). The input data of the base matrix are real numbers not less than -1. The verification matrix is constructed by replacing each entry of the base matrix with $z \times z$ submatrix: every -1 is exchanged with a zero matrix and every non-negative number with a ones matrix with a cyclic right shift. Therefore, given the code dimension k (or block length n) and the basis matrix, the LDPC code is defined.

Apparently, any LDPC code check matrix in the IEEE 802.16e standard is represented in an approximate lower-triangular form without any row or column operations, so fast coding can be incorporated directly. For any matrix H in 802.16e, it always has $N = n$ and $g = z$. This approach allows using these channels for the transmission of both control and combat commands/signals.

Assessment of the stability of the proposed crypto-code constructions

To estimate time and speed indicators, it is customary to use a unit of measurement *cpb*, where *cpb* (cycles per byte) – the number of processor cycles required to process 1 byte of input information.

The complexity of the algorithm can be calculated using the expression

$$Per = Util * CPU_clock / Rate, \tag{26}$$

where *Util* – processor core utilization (%); *Rate* – Algorithm bandwidth (byte/s).

Table 6 shows the results of studies of the dependence of the length of the input sequence on the MV2 algorithm on the number of processor cycles.

Table 7 presents the results of studies of the assessment of time and speed indicators of procedures for applying and removing damage.

Table 8 shows the results of research on the dependence of the length of the code sequence of

Niederreiter HCCC on the number of processor cycles for performing elementary operations in the software implementation of CCC.

Analysis of the results of the table 8 showed that the energy consumption of the practical implementation of Niederreiter HCCC will decrease by 7%, while the implementation is possible on the main hardware and software platforms that have become widespread:

- 8/16-bit microcontrollers and smart cards;
- 32-bit microprocessors and microcontrollers (ARM, IA 32);
- 64-bit general purpose processors (AMD64, Intel 64).

Table 9 presents the results of studies of the assessment of time and speed indicators of procedures for applying and removing damages.

Table 6 – Results of research on the dependence of the length of the input sequence on the MV2 algorithm on the number of processor cycles

The length of the code sequence		MV2		
		10	100	1000
The number of function calls that implement elementary operations	addition	3942	28673	275499
	subtraction	1794	3810	23881
	division	3274	4804	20104
	multiplication	19	109	1009
	comparison	8939	60963	578784
Sum		17968	98359	899277
Duration of execution of functions* in processor clocks	addition	19.53	93.58	2297.36
	subtraction	8.89	12.43	199.14
	division	16.22	15.68	167.65
	multiplication	0.09	0.36	8.41
	comparison	44.28	198.96	4826.43
Sum		89	321	7499
Duration of execution** in msec		89	321	7499

Note: * – duration of 1000 operations in processor clocks: character reading – 27 clocks, line comparison – 54 clocks, line concatenation – 297 clocks; ** – for the calculation, a processor with a clock frequency of 2 GHz is taken, taking into account the loading of the operating system at 5%

Table 7 – Research results of evaluation of time and speed indicators of procedures for applying and removing damage

Indicators	The length of the code sequence	Bandwidth of the algorithm, Rate (bytes/sec)	Processor core utilisation (%)	Algorithm complexity, Per (cpb)	Indicators
The number of calls to functions that implement elementary operations	10	0,089	112,3596	90	0,801
	100	0,321	311,5265	322	1,034
	1000	7,499	133,3511	7500	66,166

Table 8 – Results of research on the dependence of the length of the code sequence on the number of processor cycles

The length of the code sequence		Niederreiter HCCC on MEC			Niederreiter CCC on MEC		
		10	100	1000	10	100	1000
The number of function calls that implement elementary operations	Reading the symbol	10294 397	28750 457	76759 874	11018 042	30800 328	80 859 933
	String comparison	3 406 921	9 246 748	25478 498	3 663 356	10199 898	26 364 634
	String concatenation	1 705 544	5 045 748	12379 422	1834 983	5125 564	13 415 329
Sum		15406 862	43042 953	114617 794	16516 381	46125 790	120639 896
Duration of execution of functions* in processor clocks	Reading the symbol	295374	810478	2 001 167	297 487	831 609	2 183 218
	String comparison	178 814	531 379	1 248 684	197 821	550 794	1 423 690
	String concatenation	544 990	1 328 114	3 586 486	544 990	1 522 293	3 984 353
Sum		1 006 781	2 749 548	7 247 488	1 040 298	2 904 696	7 591 261
Duration of execution** in msec		0,52	1,37	3,4	0,55	1,53	4

Note: ** – a processor with a clock frequency of 2 GHz is taken for the calculation, taking into account the load of the operating system 5%

Table 9 – Results of studies of the assessment of time and speed indicators of procedures for applying and removing damage

Indicators	The length of the code sequence	Working time (s)	Bandwidth of the algo-rithm, Rate (bytes/sec)	Processor core utilisation (ticks)	Algorithm comp-lexity, Per (cpb)
The number of function calls that implement elementary operations	10	0,089	112,3596	90	0.801
	100	0,321	311,5265	322	1.034
	1000	7,499	133,3511	7500	66.166

Thus, the analysis of the basic principles of the construction of Niederreiter MCCC and systems of multi-channel cryptography on lossy codes allows for the development of hybrid cryptosystems.

The main difference from the "classical" approach of forming a hybrid cryptosystem is the use of CCC with fast algorithms of crypto-transformations (the speed of transformations can be compared with the speed of crypto-transformations in BSC). Niederreiter CCC acts as the main mechanism for ensuring the stability (security) of information with the subsequent use of the MV2 algorithm (systems based on lossy codes).

This approach provides a reduction in energy costs (the power of the Niederreiter MCCC alphabet) with

further transmission through one or more channels, which allows the use of almost every type of cyberspace channel in a prospective system of joint leadership and military control.

Statistical tests are used to experimentally assess how closely crypto-algorithms approximate generators of "random" sequences [11].

The NIST STS test suite was proposed as part of a competition for a new US national block cipher standard. This set was used to investigate the statistical properties of candidates for a new block cipher.

Today, the testing method proposed by NIST is the most common among developers of cryptographic means of information protection [11].

The results of the research are given in table 10.

Table 10 – Results of statistical security studies

Cryptosystems	Number of tests in which > 99% of sequences passed tests, (%)	Number of tests in which > 96% of sequences passed tests	Number of tests in which < 96% of sequences passed tests
CCC on MEC	149 (78,83)	189	0
CCC on shortened MEC	151 (79,89)	189	0
CCC on lengthened MEC	152 (80,42)	189	0
HCCC on shortened MEC	153 (80,95)	189	0
HCCC on lengthened MEC	155 (82)	189	0

The results in the table 10, show that despite the reduction of the field strength to $GF(2^6)$ for MCCC and $GF(2^4)$ for HCCC, the statistical characteristics of such crypto-code constructions turned out to be, at least, no worse than the traditional Niederreiter CCC on $GF(2^{10})$. All cryptosystems passed 100% of tests, and the best

result was shown by HCCC on shortened MEC: 155 out of 189 tests passed at the level of 0.99, which is 82% of the total number of tests. At the same time, Niederreiter traditional CCC on $GF(2^{10})$ showed 149 tests at the level of 0.99. The results of the speed of transformations are shown in Fig. 18.

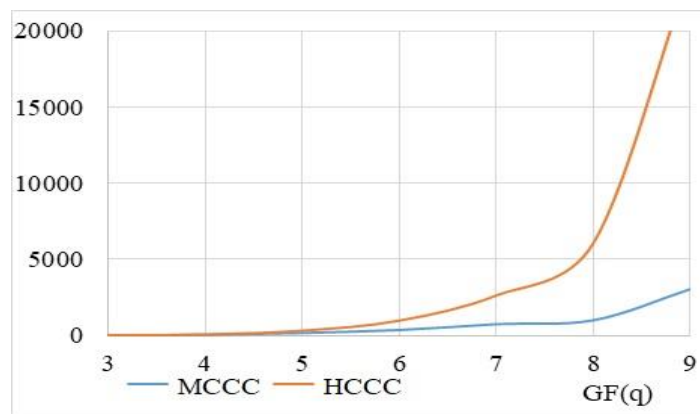


Fig. 18. Dependencies of the complexity of cryptogram formation, when using (n, k, d) code on GF(q)

If the masked code is given by the check matrix H in the general case in a non-systematic form, then to form the code word it is necessary to calculate the check symbols and place them in the appropriate place in the code word.

The complexity of decoding is determined by the complexity of the algebraic algorithm for decoding the algebraic block code.

For BCH codes, RS codes and their generalizations, alternative codes and their subclasses, error localization is reduced to solving a system of linear equations.

The complexity of decoding is:

$$S_{\text{pm}} = n^{5/2} + (2 \times n^3) + t^{5/2}, \quad (27)$$

$$S_{\text{pm(HCCC)}} = n \times m \times L + n^{5/2} + (2 \times n^3) + t^{5/2}. \quad (28)$$

The dependence of addition and multiplication operations on the finite field in various cryptosystems is presented in the table 11. The results in the table 10 confirm a reduction of ≈ 7 times the number of addition and multiplication operations over the finite field in the proposed HCCC on lossy codes over $GF(2^4)$ in comparison with MCCC on MEC over the field $GF(2^6)$.

The obtained result confirms the competitiveness of HCCC in post-quantum cryptography.

Table 11 – Dependence of addition and multiplication operations on the final field in different cryptosystems

Cryptosystem	$GF(q)$						
	3	4	5	6	7	8	9
MCCC on MEC	821	7627	64948	531613	4278546	34201122	272768399
HCCC on MEC	828	7657	65103	532243	4280451	34206222	272789350

Conclusions

1. In the conditions of a hybrid war, the use of means of information suppression/blocking significantly reduces the possibility of using control system means and communication channels based on outdated hardware communication tools and a cipher body. The use of civilian channels of cyberspace (a set of Internet, computer and mobile technology channels) requires the use of cryptographic systems. However, in the conditions of the rapid growth of computing capabilities of quantum computers (the emergence of full-scale quantum computers), ensuring the stability of classical symmetric and asymmetric cryptosystems (including asymmetric cryptosystems based on elliptic curves) is called into question. Which in turn requires the use of post-quantum cryptography algorithms. Among the contenders are the crypto-code constructions of McEliece and Niederreiter, which provide stability requirements and integrated (additionally) ensure the reliability and efficiency of

providing information.

2. The presented algorithms of crypto-code constructions provide the necessary level of stability, efficiency and reliability when using various communication channels, which allows their use in a prospective system of joint leadership and military management in the conditions of conducting hybrid warfare.

3. The combination of crypto-code constructions with damage mechanisms (lossy codes) provides an additional increase (maintenance) of the stability level and the practical implementation of HCCC on various algebraic geometric codes and/or LDPC codes. This approach provides a ≈ 7 -fold reduction in the number of addition and multiplication operations over the final field in the proposed HCCC on lossy codes over $GF(2^4)$ in comparison with MCCC on MEC over the field $GF(2^6)$ and the possibility of timely change of constructions and/or code constructions, which will allow to ensure the use of cyberspace channels in the prospective system of joint management and military control.

REFERENCES

- (2021), *Cybersecurity Strategy of Ukraine safe cyberspace is the key to successful development of the country*, Decree of the President of Ukraine dated August 26, 2021 No. 447/2021, URL: <https://www.president.gov.ua/documents/4472021-40013>.
- (2021), *Про Стратегічний оборонний бюлетень України*, Decree of the President of Ukraine dated August 20, 2021 No. 473/2021, URL: <https://www.president.gov.ua/documents/4732021-40121>.
- (2016), *Report on Post-Quantum Cryptography*, URL: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/NIST.IR.8105.pdf>
- Hryshchuk, R.V. and Danik, Yu.G. (2016), *Fundamentals of cyber security*, Monograph, Zhnaeu, Zhytomyr, 2016, 636 p.
- Ralph D., Thiele (2013), "Building C4ISR Capabilities in and for the Gulf", *ISPSW Strategy Series*, Issue No. 227, available at: https://www.files.ethz.ch/isn/164095/227_Thiele.pdf
- National Research Council (2006), *C4ISR for Future Naval Strike Groups*, 300 p., available at: <http://nap.edu/11605>.
- Yevseev, S.P., Tomashevskiy, B.P., Ivanchenko, S.O., Zinchenko, Y.V. and Havrylenko O.V. (2021), "Structural model of a modified special purpose system", *Special Telecommunications Systems and Information Protection*, Issue 1 (35), pp. 25–39.
- Bartock, M., Cichonski, J., Souppaya, M., Smith, M., Witte, G. and Scarfone, K. (2016), *Guide for Cybersecurity Event Recovery*, NIST, DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-184>
- NIST (2020), *Security requirements for cryptographic modules*, URL: <https://csrc.nist.gov/publications/fips/fips140-2/fips1402.pdf>
- NIST (2017), *Guide to LTE Security*, URL: https://csrc.nist.gov/publications/drafts/800-187/sp800_187_draft.pdf
- Yevseev, S., Ponomarenko, V., Laptev, O. and Milov, O. (2021), *Synergy of building cybersecurity systems*, monograph, PC TECHNOLOGY CENTER, Kharkiv, 188 p.
- Sidelnikov, V. M. (2002), "Cryptography and Coding Theory", *Moscow University and the Development of Cryptography in Russia*, MSU, Moscow, pp. 1-22.
- Kuznetsov, O.O., Yevseev, S.P. and Watermelon S.V. (2008), *Information protection and economic security of the enterprise*, Monograph, KhNEU, Kharkiv, 360 p.

14. Kuznetsov, O. O., Evseyev, S. P., Kavun, S. V. and Korol, O. G. (2009), *Signals and codes. Algebraic Methods for Synthesis*, Monograph, KhNEU, Kharkiv, Ukraine, 384 p.
15. Hoppa, V. D. (1984), "Codes and information", *Uspekhi matematicheskikh nauk*, Vol. 30, no. 1(235), pp. 77–120.
16. Yevseyev, S.P. and Tsyhanenko, O.S. (2018), "Development of Niederreiter's asymmetric crypto-code construction on modified elliptic codes", *Information Processing Systems*, Issue 2(153), pp. 127-135.
17. Rzaev, Kh. and Mammadova T. (2018), "Mathematical model of the modified Niederreiter crypto-code structures", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 4, pp. 37-44, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.4.06>
18. Michtchenko, V., and Vilanski, Y. (2007), *Damaged texts and multichannel cryptography*, Encyclopedics, Minsk, 292 p.
19. Michtchenko, V., Vilanski, Y., and Lepin, V. (2007), *MV 2 cryptographic algorithm*, Minsk, 2007, 147 p.
20. Rafael, Misoczki, Jean-Pierre, Tillich, Nicolas, Sendrier and Paulo S. L. M., Barreto (2013), *MDPC-McEliece: New McEliece Variants from Moderate Density Parity-Check Codes*, 21 p., available at: <https://eprint.iacr.org/2012/409.pdf>.
21. Kozlov, A. V., Krouk, E. A., and Ovchinnikov, A. A. (2013), "An approach to development of block-commutative codes with low density of parity check", *Journal of instrument engineering*, Vol. 56, No. 8, pp. 9-14.
22. Akulinin, S.A. and Sviridova, I.V. (2015), "Setting ldpc codes for channels with additive white gaussian noise", *Bulletin of VSTU*, Vol. 11, No. 6, pp. 117-120.
23. Novikov, R.S. and Astrakhantsev, A.A. (2013), "Analysis of characteristics of error-correcting codes", *Information processing systems*, issue 9 (116), pp. 164–167.
24. Bashkurov, A.V. (2015), Implementation of the LDPC-decoder on the massively parallel computing devices, VSTU, Voronezh.
25. Huang, J., Zhou, S. and Willett, P. (2008), "Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, pp. 1684-1696, DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2008.081208>
26. Berlekamp, E.R. (2015), *Algebraic Coding Theory: Revised Edition*, Revised ed. Edition, WSPC, 502 p.
27. Blahut, R. (1983), *Theory and Practice of Error Control Codes Reprint. with corr Edition*, Addison-Wesley, 500 p.

Received (Надійшла) 21.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Томашевський Богдан Паїсійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, кафедра кібербезпеки, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, Тернопіль, Україна;

Bogdan Tomashevsky – Candidate of Engineering Sciences, Senior researcher, Department of Cyber Security, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine;

e-mail: bogdan_tomashevsky@tntu.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1934-4773>.

Євсєєв Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Serhii Yevseyev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Cyber Security, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Serhii.Yevseyev@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1647-6444>.

Погасій Сергій Сергійович – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Serhii Pohasi – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Cyber Security, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: spogasiy1978@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4340-3693>.

Мілевський Станіслав Валерійович – кандидат економічних наук, доцент кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Stanislav Milevskiy – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Cyber Security, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: milevskiy@tntu.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5087-7036>.

Механізми забезпечення безпеки каналів перспективної системи управління

Б. П. Томашевський, С. П. Євсєєв, С. С. Погасій, С. В. Мілевський

Анотація. Розвиток систем військового (державного) управління в сучасних умовах гібридної війни вимагає можливості стрімкого розширення як функціональності, так і масштабування фізичної та логічної основи управління, нарощування спектра цифровізації та використання як військових, так і цивільних каналів зв'язку щодо управління військами та зброєю. При цьому необхідно враховувати не тільки обчислювальні можливості противника, засоби придушення та/або блокування каналів зв'язку системи управління, а також розвиток квантових технологій, які висувають нові більш жорсткі вимоги до механізмів забезпечення безпеки на основі алгоритмів симетричної та несиметричної криптографії. За рахунками спеціалістів НІСТ США повномасштабний квантовий комп'ютер забезпечує злам, як симетричних, так й несиметричних криптосистем за поліноміальний час, що суттєво зменшує їх стійкість. В роботі пропонуються механізми постквантової криптографії, які дозволяють забезпечити стійкість не тільки каналів зв'язку, та й елементів структури системи управління. Основою постквантових алгоритмів шифрування поєднання алгоритмів (схем) крипто-кодових конструкцій з криптосистемами на збиткових кодах (багатоканальної криптографії), а також можливість їх поєднання з методами цифрової стеганографії. Такий підхід забезпечує можливість приховування елементів управлінських команд, а використання різних каналів забезпечує можливість приховування окремих елементів криптограм.

Ключові слова: крипто-кодові конструкції; алгеброгеометричні коди; LDPC-коди; система управління військами; квантовий період.

Applied problems of information systems operation

УДК 519.668:319.66

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.11>В. Ю. Дубницький¹, А. М. Кобилін¹, О. А. Кобилін², Ю. І. Кушнерук³, Ю. І. Шевяков³¹ ННІ “Каразінський банківський інститут” ХНУ імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна³ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ОБЧИСЛЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ФУНКЦІЙ КОМПЛЕКСНОЇ ЗМІННОЇ З ІНТЕРВАЛЬНИМ АРГУМЕНТОМ, ВИЗНАЧЕНИМ В ГІПЕРБОЛІЧНІЙ ФОРМІ

Анотація. Наведено відомості про інтервальні числа, представлені в класичному вигляді, системі ЦЕНТР – РАДІУС та в гіперболічному вигляді. Запропоновано правила переходу від однієї із форм подання інтервальних чисел до інших. Наведено відомості про комплексні інтервальні числа, дійсна і уявна частина яких представлені в гіперболічному вигляді. Описано правила виконання основних арифметичних дій з цими числами та обчислення інтервальних значень показникової, логарифмічної функції, прямих та обернених тригонометричних функцій, прямих та обернених гіперболічних функцій. Для функцій комплексного змінного наведено відомості про їхню дійсну та уявну частину. Перелік функцій відповідає функціям комплексного змінного, що входять до системи EXCEL. Отримано співвідношення для визначення дійсної та уявної частини функцій секансу, косекансу, тангенсу та котангенсу для кругових тригонометричних та гіперболічних функцій, які були відсутні у найбільш поширеній довідковій літературі. Наведено приклади, що ілюструють застосування запропонованої методики.

Ключові слова: інтервальні обчислення; функції комплексної змінної; комплексні інтервальні числа.

Вступ

На даний час для обчислень, в яких вхідні дані обтяжено невизначеністю, що виникає в процесі їх отримання, загальноприйняте розрізняти невизначеності типу А і типу В. Відповідно до роботи [1] розрізняють невизначеність типу А, яку оцінюють статистичними методами, та невизначеність типу В, яка має ознаки, що притаманні для нестохастичної невизначеності. У цьому випадку використовують методи інтервального аналізу [2, 3]. Приклади його застосування для розв’язання різноманітних задач та відомості про програми, які призначені для цього, описано у роботах [4-8]. Особливо слід зазначити застосування інтервальних методів для розв’язання деяких задач електротехніки [9, 10]. У зв’язку з цим в роботі [11] викладено досвід застосування інтервальних чисел для виконання основних арифметичних дій із комплексними числами. Авторам даного повідомлення не вдалося знайти в доступній їм літературі опис способів застосування інтервальних обчислень для визначення чисельних значень функцій комплексного змінного.

Аналіз літератури. Відповідно до [2, 3, 12, 13] в даній роботі дійсне інтервальне число $[A]$ буде визначено у вигляді пари дійсних чисел:

$$[A] = (a_1, a_2) \quad 0 < a_1 \leq a_2. \quad (1)$$

Будемо говорити, що умова (1) визначає інтервальне число в класичній формі. Основні арифметичні дії з інтервальними числами в цьому випадку виконують за правилами:

$$[A] + [B] = (a_1, a_2) + (b_1, b_2) = [(a_1 + b_1), (a_2 + b_2)]; \quad (2)$$

$$[A] - [B] = (a_1, a_2) - (b_1, b_2) = [(a_1 - b_2), (a_2 - b_1)]; \quad (3)$$

$$[A] \cdot [B] = (\min(U), \max(U)), \quad U = (a_1 b_1, a_1 b_2, a_2 b_1, a_2 b_2); \quad (4)$$

$$[A] / [B] = (a_1, a_2) \cdot (1/b_2, 1/b_1), \quad 0 \notin [b_1, b_2]. \quad (5)$$

В роботі [3] запропоновано представлення інтервального числа $\langle A \rangle$ у системі ЦЕНТР-РАДІУС як упорядкованої пари дійсних чисел:

$$\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle, \quad (6)$$

де $a = \frac{a_1 + a_2}{2}, \quad r_a = \frac{a_2 - a_1}{2}. \quad (7)$

У подальшому будемо приймати, що $|r_a| < |a|$. Інші випадки в роботі не розглянуто, тому що вони не відповідали фізичному змісту задач, які розв’язували автори даного повідомлення. Основні арифметичні дії з інтервальними числами в системі ЦЕНТР-РАДІУС виконують за правилами, наведеними в [9]:

$$A + B = \langle a + b, r_a + r_b \rangle; \quad (8)$$

$$A - B = \langle a - b, r_a + r_b \rangle. \quad (9)$$

У роботі [14] прийнята умова, що межі інтервалів, які визначають дані числа, утворені обчислювальними помилками, похибками вимірювань або неповним знанням області зміни деякої фізичної величини. Тому повинні виконуватися нерівності:

$$a \geq r_a \geq 0, \quad b \geq r_b \geq 0. \quad (10)$$

У протилежному випадку будемо вважати, що задача, в межах наших уявлень про об'єкт дослідження, фізичного змісту не має.

В роботі [3] запропоновано формули для виконання в системі ЦЕНТР-РАДІУС операцій ділення та множення в такому вигляді:

$$\langle a, r_a \rangle \langle b, r_b \rangle = \langle ab + r_a r_b, ar_b + br_a \rangle; \quad (11)$$

$$\frac{\langle a, r_a \rangle}{\langle b, r_b \rangle} = \left\langle \frac{ab + r_a r_b}{b^2 - r_b^2}, \frac{ar_b + br_a}{b^2 - r_b^2} \right\rangle. \quad (12)$$

В роботі [3] запропоновано піднесення в цілий додатний степінь інтервального числа $[A] = (a_1, a_2)$, яке визначено в класичній формі, виконувати за правилом:

$$[A]^n = \begin{cases} [a_1^n, a_2^n], & \text{якщо } a_1 > 0; \\ [0, \max\{a_1^n, a_2^n\}], & \text{якщо} \\ & 0 \in [a_1, a_2], n = 2k, k = 1, 2, \dots; \\ [a_1^n, a_2^n], & \text{якщо} \\ & 0 \in [a_1, a_2], n = 2k + 1, k = 0, 1, \dots; \\ [a_2^n, a_1^n], & \text{якщо } a_2 < 0, n = 2k, k = 1, 2, \dots; \\ [a_1^n, a_2^n], & \text{якщо } a_2 < 0, n = 2k + 1. \end{cases} \quad (13)$$

Для тієї ж операції, яку виконують в системі ЦЕНТР-РАДІУС, в роботі [9] наведено співвідношення:

$$A^n = \langle a, r_a \rangle^n = \langle G, R \rangle; \quad (14)$$

за умови, що $n \in \mathbb{Z}$. Тоді:

$$G = \sum_{k=0}^n C_n^{2k} r_a^{2k} a^{n-2k}; \quad (15)$$

$$R = \sum_{k=0}^n C_n^{2k+1} r_a^{2k+1} |a|^{n-(2k+1)}.$$

Для $n = 2$ отримаємо:

$$\langle A \rangle^2 = \langle a^2 + r_a^2, 2 \cdot |a| \cdot r_a \rangle. \quad (16)$$

В роботах [14, 15] запропоновано гіперболічну форму подання інтервального числа. У цьому варіанті інтервальне число x записують у вигляді:

$$x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \quad (17)$$

У співвідношенні (17) прийнято, що θ – спеціальний символ. За замовченням вважають, що $\theta^2 = 1$. Величину ρ в роботах [14, 15] названо гіпермодулем, величину ϕ – аргументом гіперболічного інтервального числа (гіперболічного числа, згідно з термінологією, яка прийнята в роботі [14]). Величини ρ і ϕ визначають за співвідношеннями:

$$\rho = \sqrt{a_1 a_2}, \quad \phi = \frac{1}{2} \ln \frac{a + r_a}{a - r_a} = \frac{1}{2} \ln \frac{a_2}{a_1}. \quad (18)$$

Із співвідношення (18) виходить, що гіпермодуль – це середньо геометрична величина меж інтервалу. Відповідно до роботи [5] в табл. 1 наведено зв'язки між різними формами подання інтервальних чисел, які буде розглянуто в даній роботі.

Основні арифметичні дії для пари гіперболічних чисел $x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$ та $y = \delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi)$ відповідно до [14,15], виконують за правилами:

$$x + y = (\rho \cdot ch\phi + \delta \cdot ch\psi) + \theta(\rho \cdot sh\phi + \delta \cdot sh\psi). \quad (19)$$

$$x - y = (\rho \cdot ch\phi - \delta \cdot ch\psi) + \theta(\rho \cdot sh\phi - \delta \cdot sh\psi). \quad (20)$$

$$x \cdot y = \rho\delta(ch(\phi + \psi) + \theta \cdot sh(\phi + \psi)) \quad (21)$$

$$x^{-1} = (\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi))^{-1} = (ch(-\phi) + \theta \cdot sh(-\phi)) / \rho. \quad (22)$$

$$\frac{x}{y} = \frac{\rho}{\delta} (ch(\phi - \psi) + \theta \cdot sh(\phi - \psi)). \quad (23)$$

$$x^n = (\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi))^n = \rho^n (ch(n\phi) + \theta \cdot sh(n\phi)). \quad (24)$$

Також в роботі [14] розглянуто випадки, в яких одна з величин стала. Тоді отримаємо:

$$c \pm x = (c \pm \rho \cdot ch(\phi)) \pm \theta \cdot sh(\phi). \quad (25)$$

Для множення сталої величини c на гіперболічне число x отримаємо:

$$cx = c\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \quad (26)$$

Таблиця 1 – Зв'язки між різними формами подання інтервальних чисел

Форми подання інтервальних чисел	Форми подання інтервальних чисел		
	Класична, $[A] = (a_1, a_2)$	Система ЦЕНТР-РАДІУС, $\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	Гіперболічна, $x = f(\rho, \phi)$
Класична, $[A] = (a_1, a_2)$	$[A] = (a_1, a_2)$	$[A] = (a - r_a, a + r_a)$	$[A] = (\rho[ch\phi - sh\phi] ; \rho[ch\phi + sh\phi])$
Система ЦЕНТР-РАДІУС, $\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	$\langle A \rangle = \left\langle \frac{a_1 + a_2}{2}, \frac{a_2 - a_1}{2} \right\rangle$	$\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	$\rho = \sqrt{a_1 a_2}; \quad \phi = \frac{1}{2} \ln \frac{a_2}{a_1}$
Гіперболічна, $x = f(\rho, \phi)$	$[A] = (\sqrt{a_1 a_2} ch(\phi), \sqrt{a_1 a_2} sh(\phi));$ $\phi = \frac{1}{2} \ln \frac{a_2}{a_1}$	$\langle A \rangle = \sqrt{a^2 - r_a^2} \cdot (ch\phi + \theta \cdot sh\phi);$ $\phi = \frac{1}{2} \ln \frac{a + r_a}{a - r_a}$	$x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$

Для операції ділення у вказаній роботі наведено два варіанти операції. У першому варіанті:

$$\frac{x}{c} = \frac{\rho}{c}(ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \quad (27)$$

У другому варіанті:

$$\frac{c}{x} = \frac{c}{\rho}(ch\phi - \theta \cdot sh\phi). \quad (28)$$

Визначимо, використовуючи співвідношення (24) та (19) часткову суму ряду виду:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{j=1}^k \alpha_j x^j = \sum_{j=1}^k [a_j \rho (ch\phi + \theta \cdot sh\phi)]^j = \\ &= \sum_{j=1}^k a_j \rho^j (ch(j\phi) + \theta \cdot sh(j\phi)). \end{aligned} \quad (29)$$

У роботах [11-13] та [16-18] описано застосування інтервальних чисел при діях з комплексними числами. Відповідно до цих робіт комплексне інтервальне число визначимо таким чином:

$$\left[\overset{\bullet}{Z} \right] = [X] + i[Y] = (x_1, x_2) + i(y_1, y_2) \quad i = \sqrt{-1}. \quad (30)$$

Тобто, геометричним образом комплексного інтервального числа буде прямокутник, визначений на комплексній площині, геометричним образом дійсного інтервального числа буде відрізок числової осі. Відповідно до [19] для зручності подальших обчислень представимо комплексне інтервальне число у вигляді впорядкованої пари $\left[\overset{\bullet}{Z} \right] = \langle [X], [Y] \rangle$

і розглянемо основні арифметичні дії за правилами:

$$\left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 + \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 = \langle [X]_1 + [X]_2; [Y]_1 + [Y]_2 \rangle; \quad (31)$$

$$\left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 - \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 = \langle [X]_1 - [X]_2; [Y]_1 - [Y]_2 \rangle; \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 &= \\ &= \langle [X]_1 [X]_2 - [Y]_1 [Y]_2; [X]_1 [Y]_2 + [X]_2 [Y]_1 \rangle; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 / \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 &= \\ &= \left\langle \frac{[X]_1 [X]_2 + [Y]_1 [Y]_2}{[X]_1^2 + [X]_2^2}, \frac{[X]_2 [Y]_1 - [X]_1 [Y]_2}{[X]_1^2 + [X]_2^2} \right\rangle. \end{aligned} \quad (34)$$

Для визначення модуля дійсного інтервального числа вигляду (1) в роботах [2, 12, 13] наведено співвідношення:

$$[A] = \max \{ |a_1|, |a_2| \}. \quad (35)$$

Для модуля комплексного інтервального числа вигляду (29) в роботах [16, 18] є співвідношення:

$$\begin{aligned} \left| \left[\overset{\bullet}{Z} \right] \right| &= \sqrt{[X]^2 + [Y]^2} = \\ &= \sqrt{|\max(x_1, x_2)|^2 + |\max(y_1, y_2)|^2}. \end{aligned} \quad (36)$$

Виконання арифметичних дій з інтервальними комплексними числами, які представлено в гіперболічній формі, розглянуто в роботі [11]. Розглянемо пару комплексних інтервальних чисел, в яких дійсна і уявна частини представлено в гіперболічній формі відповідно до співвідношення (17):

$$\begin{aligned} \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 &= x_1 + iy_1 = \\ &= \{ \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi) \} + i \{ \delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi) \}; \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 &= x_2 + iy_2 = \\ &= \{ \gamma(ch\omega + \theta \cdot sh\omega) \} + i \{ \lambda(ch\eta + \theta \cdot sh\eta) \}. \end{aligned} \quad (38)$$

Використовуючи (19)...(23) і (30)...(33), отримаємо наступні співвідношення для основних арифметичних дій з комплексними інтервальними числами, представленими в гіперболічній формі. Суму двох інтервальних комплексних чисел у цьому випадку можна представити у вигляді:

$$T_1 = \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 + \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 = R_1 + iE_1, \quad (39)$$

де $R_1 = (\rho ch\phi + \gamma ch\omega) + \theta(\rho sh\phi + \lambda sh\omega); \quad (40)$

$$E_1 = (\delta ch\psi + \lambda ch\eta) + \theta(\rho sh\psi + \lambda sh\eta). \quad (41)$$

Різницю двох інтервальних комплексних чисел у цьому випадку можна представити у вигляді:

$$T_2 = \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 - \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 = R_2 + iE_2, \quad (42)$$

де $R_2 = (\rho ch\phi - \lambda ch\omega) + \theta(\rho sh\phi - \lambda sh\omega); \quad (43)$

$$E_2 = (\delta ch\psi - \lambda ch\eta) + \theta(\rho sh\psi - \lambda sh\eta). \quad (44)$$

Добуток двох інтервальних комплексних чисел у цьому випадку можна представити у вигляді:

$$T_3 = \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 \times \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 = R_3 + iE_3, \quad (45)$$

де $R_3 = \rho\gamma [ch(\phi + \omega) + \theta sh(\phi + \omega)] - \lambda\delta [ch(\psi + \eta) + \theta sh(\psi + \eta)]; \quad (46)$

$$E_3 = \rho\lambda [ch(\phi + \eta) + \theta sh(\phi + \eta)] + \gamma\delta [ch(\omega + \psi) + \theta sh(\omega + \psi)]. \quad (47)$$

Результат ділення двох інтервальних комплексних чисел у цьому випадку можна представити у вигляді:

$$T_4 = \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_1 / \left[\overset{\bullet}{Z} \right]_2 = R_4 + iE_4, \quad (48)$$

$$R_4 = \frac{\left[\rho\gamma \left(ch(\phi + \omega) + \theta \cdot sh(\phi + \omega) \right) + \left[\delta\lambda \left(ch(\psi + \eta) + \theta \cdot sh(\psi + \eta) \right) \right] \right]}{\left[\gamma^2 \left(ch(2\omega) + \theta \cdot sh(2\omega) \right) \right] + \left[\lambda^2 \left(ch(2\eta) + \theta \cdot sh(2\eta) \right) \right]}; \quad (49)$$

$$E_4 = \frac{\left[\gamma\delta \left(ch(\omega + \psi) + \theta \cdot sh(\omega + \psi) \right) \right] - \left[\rho\lambda \left(ch(\phi + \eta) + \theta \cdot sh(\phi + \eta) \right) \right]}{\left[\gamma^2 \left(ch(2\omega) + \theta \cdot sh(2\omega) \right) \right] + \left[\lambda^2 \left(ch(2\eta) + \theta \cdot sh(2\eta) \right) \right]}. \quad (50)$$

Піднесення комплексного інтервального числа $\left[\overset{\bullet}{Z} \right]$, яке представлено в гіперболічній формі у вигляді співвідношення

$$\left[\overset{\bullet}{Z} \right] = \left\{ \rho \left(ch\phi + \theta \cdot sh\phi \right) \right\} + i \left\{ \delta \left(ch\psi + \theta \cdot sh\psi \right) \right\} \quad (51)$$

у цілій додатний степінь n , виконуємо згідно з співвідношенням:

$$\left[\overset{\bullet}{Z} \right]^n = \sum_{k=0}^n C_n^k \cdot i^k \rho^{n-k} \left[\begin{array}{l} ch((n-k)\phi) + \\ + \theta \cdot sh((n-k)\phi) \end{array} \right] \times \times \delta^k \left[ch(k\psi) + \theta \cdot sh(k\psi) \right].$$

Величину i^k визначимо за співвідношенням:

$$i^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } k \equiv 4 \pmod{0}; \\ i, & \text{якщо } k \equiv 4 \pmod{1}; \\ -1, & \text{якщо } k \equiv 4 \pmod{2}; \\ -i, & \text{якщо } k \equiv 4 \pmod{3}. \end{cases} \quad (52)$$

Для визначення аргументу комплексного інтервального числа, яке представлено в гіперболічній формі, слід виконати наступні перетворення:

$$d = \frac{\delta \left(ch\psi + \theta \cdot sh\psi \right)}{\rho \left(ch\phi + \theta \cdot sh\phi \right)} = \frac{\delta}{\rho} \times \times \left[ch(\psi - \phi) + \theta \cdot sh(\psi - \phi) \right]. \quad (53)$$

Прийmemo, що

$$\delta / \rho = \chi ; \psi - \phi = \tau. \quad (54)$$

Тоді співвідношення (53) прийме вигляд:

$$d = \chi \left(ch\tau + \theta \cdot sh\tau \right). \quad (55)$$

Отже:

$$\arg \left[\overset{\bullet}{Z} \right] = \begin{cases} \arctg(d), & \text{якщо } R > 0, \\ \pi + \arctg(d), & \text{якщо } R < 0, E \geq 0, \\ -\pi + \arctg(d), & \text{якщо } R < 0, E < 0, \\ \pi / 2, & \text{якщо } R = 0, E > 0, \\ -\pi / 2, & \text{якщо } R = 0, E < 0. \end{cases} \quad (56)$$

В умову (56) входять інтервальні числа і відно-

сини між ними: $<$, $>$, \geq . Застосування цих відносин для порівняння інтервальних величин розглянуто в роботах [4, 20, 21]

Обчислення функції $[U] = \arctg[X]$ для інтервального числа, заданого в гіперболічній формі, слід виконувати згідно з співвідношенням (57):

$$\arctg(d) = = \sum_{k=0}^5 a_{2k+1} \left\{ \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{2k+1} \left[\begin{array}{l} ch((2k+1) \cdot (\psi - \phi)) + \\ + \theta \cdot sh((2k+1) \cdot (\psi - \phi)) \end{array} \right] \right\}. \quad (57)$$

Чисельні значення коефіцієнтів наведено в роботі [11]. Визначення модуля інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі, слід виконувати згідно з співвідношенням, наведеним в роботі [11].

$$\left[\overset{\bullet}{Z} \right] = \sqrt{\left(\overset{\bullet}{z} \right)^2 - r_z^2} \times \times \left(ch \left(\frac{1}{2} \ln \frac{z+r_z}{z-r_z} \right) + \theta \cdot sh \left(\frac{1}{2} \ln \frac{z+r_z}{z-r_z} \right) \right). \quad (58)$$

Оскільки результат розрахунку, який наведено в (58), отримано в системі ЦЕНТР-РАДІУС, то для переходу до гіперболічній формі інтервального числа використаємо співвідношення, які наведені в табл. 1. Обчислення кореня цілочисельного ступеня n для комплексного інтервального числа, заданого в гіперболічній формі, слід виконувати згідно з співвідношенням:

$$\left[\overset{\bullet}{Z} \right]^{1/n} = [H]^{1/(2n)} [T]; \quad (59)$$

$$[H]^{1/(2n)} = \sqrt{h^2 - r_h^2} \times$$

$$\times \left(ch \left(\frac{1}{2} \ln \frac{h+r_z}{h-r_h} \right) + \theta \cdot sh \left(\frac{1}{2} \ln \frac{h+r_z}{h-r_h} \right) \right); \quad (60)$$

$$[T] = \left[\cos \frac{\arctg(d) + 2s\pi}{n} + i \sin \frac{\arctg(d) + 2s\pi}{n} \right]. \quad (61)$$

В співвідношеннях (59), (60) величини h та r_h – центр та радіус, визначений для відповідного інтервального гіперболічного числа згідно з табл. 1.

З зробленого аналізу літератури приходимо до висновку, що операції множення, ділення та піднесення в цілочисельній степінь найбільш доцільно виконувати з комплексними інтервальними числами, які визначено в гіперболічній формі. Операцію обчислення кореня ступеня n з інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі, найбільш доцільно виконувати з сумісним використанням системи ЦЕНТР-РАДІУС та в гіперболічній формі подання інтервального числа.

Постановка задачі. Пропозиції до методики обчислення значень найбільш поширених елементарних функцій комплексної змінної з інтервальним аргументом.

Отримані результати. Розглянемо функцію

$$f\left[\overset{\bullet}{Z}\right] = u([X], [Y]) + iv([X], [Y]) \quad (62)$$

інтервального комплексного змінного $\left[\overset{\bullet}{Z}\right]$, вид яко-

го визначено співвідношенням (30). Тобто потрібно для кожної обраної функції виду (62) отримати співвідношення виду:

$$f(z_1, z_2) = u[(x_1, x_2); (y_1, y_2)] + iv[(x_1, x_2); (y_1, y_2)]. \quad (63)$$

Для функції $\sec(z)$ співвідношення (64) буде таким:

$$\begin{aligned} \sec(z) &= \frac{1}{\cos z} = \frac{1}{\cos(x+iy)} = \frac{1}{\cos(x)\cos(iy) - \sin(x)\sin(iy)} = \frac{1}{\cos(x)\operatorname{ch}(y) - i\sin(x)\operatorname{sh}(y)} = \\ &= \frac{\cos(x)\operatorname{ch}(y)}{\cos^2(x)\operatorname{ch}^2(y) + \sin^2(x)\operatorname{sh}^2(y)} + i \frac{\sin(x)\operatorname{sh}(y)}{\cos^2(x)\operatorname{ch}^2(y) + \sin^2(x)\operatorname{sh}^2(y)} = \frac{2\cos(x)\operatorname{ch}(y)}{\cos(2x) + \operatorname{ch}(2y)} + i \frac{2\sin(x)\operatorname{sh}(y)}{\cos(2x) + \operatorname{ch}(2y)}, \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} \cos^2(x)\operatorname{ch}^2(y) + \sin^2(x)\operatorname{sh}^2(y) &= \frac{1 + \cos(2x)}{2}\operatorname{ch}^2(y) + \frac{1 - \cos(2x)}{2}\operatorname{sh}^2(y) = \\ \text{оскільки} \quad &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch}^2(y) + \operatorname{sh}^2(y)) + \frac{\cos(2x)}{2}(\operatorname{ch}^2(y) - \operatorname{sh}^2(y)) = \frac{1}{2}(\cos(2x) + \operatorname{ch}(2y)). \end{aligned} \quad (66)$$

У подальшому в подібних співвідношеннях будемо використовувати формули зниження ступеня для $\cos^2(x)$ та $\sin^2(x)$, як в (66). Для функції $\operatorname{cosec}(z)$ співвідношення (64) буде таким:

$$\begin{aligned} \operatorname{cosec}(z) &= \frac{1}{\sin z} = \frac{1}{\sin(x+iy)} = \frac{1}{\sin(x)\cos(iy) + \cos(x)\sin(iy)} = \frac{1}{\sin(x)\operatorname{ch}(y) + i\cos(x)\operatorname{sh}(y)} = \\ &= \frac{\sin(x)\operatorname{ch}(y)}{\sin^2(x)\operatorname{ch}^2(y) + \cos^2(x)\operatorname{sh}^2(y)} - i \frac{\cos(x)\operatorname{sh}(y)}{\sin^2(x)\operatorname{ch}^2(y) + \cos^2(x)\operatorname{sh}^2(y)} = \frac{2\sin(x)\operatorname{ch}(y)}{\operatorname{ch}(2y) - \cos(2x)} - i \frac{2\cos(x)\operatorname{sh}(y)}{\operatorname{ch}(2y) - \cos(2x)}. \end{aligned} \quad (67)$$

Для функції $\operatorname{cosech}(z)$ співвідношення (64) буде таким:

$$\begin{aligned} \operatorname{cosech}(z) &= \frac{1}{\operatorname{sh} z} = \frac{1}{\operatorname{sh}(x+iy)} = \frac{1}{\operatorname{sh}(x)\operatorname{ch}(iy) + \operatorname{ch}(x)\operatorname{sh}(iy)} = \frac{1}{\operatorname{sh}(x)\cos(y) + i\operatorname{ch}(x)\sin(y)} = \\ &= \frac{\operatorname{sh}(x)\cos(y)}{\operatorname{sh}^2(x)\cos^2(y) + \operatorname{ch}^2(x)\sin^2(y)} - i \frac{\operatorname{ch}(x)\sin(y)}{\operatorname{sh}^2(x)\cos^2(y) + \operatorname{ch}^2(x)\sin^2(y)} = \frac{2\operatorname{sh}(x)\cos(y)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)} - i \frac{2\operatorname{ch}(x)\sin(y)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}. \end{aligned} \quad (68)$$

Для функції $\operatorname{th}(z)$ співвідношення (64) буде таким:

$$\begin{aligned} \operatorname{th}(z) &= \operatorname{sh}(z)/\operatorname{ch}(z) = \operatorname{sh}(x+iy)/\operatorname{ch}(x+iy) = \\ &= \frac{\operatorname{sh}(x)\operatorname{ch}(iy) + \operatorname{ch}(x)\operatorname{sh}(iy)}{\operatorname{ch}(x)\operatorname{ch}(iy) + \operatorname{sh}(x)\operatorname{sh}(iy)} = \frac{\operatorname{sh}(x)\cos(y) + i\operatorname{ch}(x)\sin(y)}{\operatorname{ch}(x)\cos(y) + i\operatorname{sh}(x)\sin(y)} = \frac{\operatorname{sh}(2x)}{2(\operatorname{ch}^2(x)\cos^2(y) + \operatorname{sh}^2(x)\sin^2(y))} + \\ &+ i \frac{\sin(2y)}{2(\operatorname{ch}^2(x)\cos^2(y) + \operatorname{sh}^2(x)\sin^2(y))} = \frac{\operatorname{sh}(2x)}{\operatorname{ch}(2x) + \cos(2y)} - i \frac{\sin(2y)}{\operatorname{ch}(2x) + \cos(2y)}. \end{aligned} \quad (69)$$

Для функції $\operatorname{cth}(z)$ співвідношення (64) буде таким:

$$\begin{aligned} \operatorname{cth}(z) &= \operatorname{ch}(z)/\operatorname{sh}(z) = \operatorname{ch}(x+iy)/\operatorname{sh}(x+iy) = \\ &= \frac{\operatorname{ch}(x)\operatorname{ch}(iy) + \operatorname{sh}(x)\operatorname{sh}(iy)}{\operatorname{sh}(x)\operatorname{ch}(iy) + \operatorname{ch}(x)\operatorname{sh}(iy)} = \frac{\operatorname{ch}(x)\cos(y) + i\operatorname{sh}(x)\sin(y)}{\operatorname{sh}(x)\cos(y) + i\operatorname{ch}(x)\sin(y)} = \frac{\operatorname{sh}(2x)}{2(\operatorname{sh}^2(x)\cos^2(y) + \operatorname{ch}^2(x)\sin^2(y))} - \\ &- i \frac{\sin(2y)}{2(\operatorname{sh}^2(x)\cos^2(y) + \operatorname{ch}^2(x)\sin^2(y))} = \frac{2\operatorname{sh}(x)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)} - i \frac{\sin(2y)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}. \end{aligned} \quad (70)$$

Для функції $\operatorname{ctg}(z)$ співвідношення (64) буде таким:

$$\operatorname{ctg}(z) = \frac{\cos(z)}{\sin(z)} = \frac{\cos(x+iy)}{\sin(x+iy)} = \frac{\cos(x)\cos(iy) - \sin(x)\sin(iy)}{\sin(x)\cos(iy) + \cos(x)\sin(iy)} = \frac{\cos(x)\operatorname{ch}(y) - i\sin(x)\operatorname{sh}(y)}{\sin(x)\operatorname{ch}(y) + i\cos(x)\operatorname{sh}(y)} = \frac{\sin(2x)}{2(\sin^2(x)\operatorname{ch}^2(y) + \cos^2(x)\operatorname{sh}^2(y))} - i \frac{\operatorname{sh}(2y)}{2(\sin^2(x)\operatorname{ch}^2(y) + \cos^2(x)\operatorname{sh}^2(y))} = \frac{\sin(2x)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)} - i \frac{\operatorname{sh}(2y)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}. \quad (71)$$

Дійсна та уявна частини функцій комплексного змінного $z = x + iy$, включених до системи EXCEL, показані в табл. 2.

Таблиця 2 – Дійсна та уявна частини функцій $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$ комплексного змінного $z = x + iy$, включених до системи EXCEL

№	Вид $f(z)$	$u(x, y)$	$v(x, y)$
1	z	x	y
2	z^2	$x^2 - y^2$	$2xy$
3	$\frac{1}{z}$	$\frac{x}{x^2 + y^2}$	$-\frac{y}{x^2 + y^2}$
4	$\frac{1}{z^2}$	$\frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}$	$-\frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}$
5 ¹⁾	$\frac{1}{z - (a + ib)}$	$\frac{x - a}{(x - a)^2 + (y - b)^2}$	$-\frac{2xy}{(x - a)^2 + (y - b)^2}$
6	\sqrt{z}	$\pm \sqrt{\frac{x + \sqrt{x^2 + y^2}}{2}}$	$\pm \sqrt{\frac{-x + \sqrt{x^2 + y^2}}{2}}$
7	e^z	$e^x \cos y$	$e^x \sin y$
8	$\sin z$	$\sin x \operatorname{ch} y$	$\cos x \operatorname{sh} y$
9	$\cos z$	$\cos x \operatorname{ch} y$	$-\sin x \operatorname{sh} y$
10	$\operatorname{sh} z$	$\operatorname{sh} x \cos y$	$\operatorname{ch} x \sin y$
11	$\operatorname{ch} z$	$\operatorname{ch} x \cos y$	$\operatorname{sh} x \sin y$
12	$\operatorname{tg} z$	$\frac{\sin 2x}{\cos 2x + \operatorname{ch} 2y}$	$\frac{\operatorname{sh} 2x}{\cos 2x + \operatorname{ch} 2y}$
13	$\operatorname{th} z$	$\frac{\operatorname{sh} 2x}{\operatorname{ch} 2x + \cos 2y}$	$\frac{\sin 2y}{\operatorname{ch} 2x + \cos 2y}$
14	$\ln z$	$\frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2)$	$\operatorname{arctg} \frac{y}{x} + 2k\pi$
15	$\sec(z)$	$\frac{2\cos(x)\operatorname{ch}(y)}{\cos(2x) + \operatorname{ch}(2y)}$	$\frac{2\sin(x)\operatorname{sh}(y)}{\cos(2x) + \operatorname{ch}(2y)}$
16	$\operatorname{sech}(z)$	$\frac{2\operatorname{ch}(x)\cos(y)}{\operatorname{ch}(2x) + \cos(2y)}$	$-\frac{2\operatorname{sh}(x)\sin(y)}{\operatorname{ch}(2x) + \cos(2y)}$
17	$\operatorname{cosec}(z)$	$\frac{2\sin(x)\operatorname{ch}(y)}{\operatorname{ch}(2y) - \cos(2x)}$	$-\frac{2\cos(x)\operatorname{sh}(y)}{\operatorname{ch}(2y) - \cos(2x)}$
18	$\operatorname{coseh}(z)$	$\frac{2\operatorname{sh}(x)\cos(y)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}$	$-\frac{2\operatorname{ch}(x)\sin(y)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}$
19	$\operatorname{tg}(z)$	$\frac{\operatorname{sh}(2x)}{\operatorname{ch}(2x) + \cos(2y)}$	$\frac{\sin(2y)}{\operatorname{ch}(2x) + \cos(2y)}$
20	$\operatorname{cth}(z)$	$\frac{\operatorname{sh}(2x)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}$	$\frac{\sin(2y)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}$
21	$\operatorname{ctg}(z)$	$\frac{\sin(2x)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}$	$-\frac{\operatorname{sh}(2x)}{\operatorname{ch}(2x) - \cos(2y)}$

1) Числа a, b - дійсні.

При вирішенні цієї задачі для інтервальних комплексних чисел слід змінні x і y , зазначені в табл. 2, вважати інтервальними числами, представленими в гіперболічній формі і мають вигляд:

$$x = \rho(\operatorname{ch}\phi + \theta \cdot \operatorname{sh}\phi), \quad y = \delta(\operatorname{ch}\psi + \theta \cdot \operatorname{sh}\psi). \quad (72)$$

Далі, за правилами, викладеними в [2, 3], виконати інтервальне розширення функцій $u(x, y)$ та $v(x, y)$. Для цього в табл. 3 описані способи виконання основних арифметичних процесів з інтервальними числами, представленими в гіперболічній формі.

Таблиця 3 – Способи виконання основних арифметичних процесів з інтервальними числами, представленими в гіперболічній формі

Вид операції	Співвідношення, що реалізує дану операцію	
	№	Вид
$x + y$	(19)	$(\rho \cdot \operatorname{ch}\phi + \delta \cdot \operatorname{ch}\psi) + \theta(\rho \cdot \operatorname{sh}\phi + \delta \cdot \operatorname{sh}\psi)$
$x - y$	(20)	$(\rho \cdot \operatorname{ch}\phi - \delta \cdot \operatorname{ch}\psi) + \theta(\rho \cdot \operatorname{sh}\phi - \delta \cdot \operatorname{sh}\psi)$
$x \cdot y$	(21)	$\rho\delta(\operatorname{ch}(\phi + \psi) + \theta \cdot \operatorname{sh}(\phi + \psi))$
$\frac{1}{x}$	(22)	$\frac{1}{\rho}(\operatorname{ch}(-\phi) + \theta \cdot \operatorname{sh}(-\phi))$
$\frac{x}{y}$	(23)	$\frac{\rho}{\delta}(\operatorname{ch}(\phi - \psi) + \theta \cdot \operatorname{sh}(\phi - \psi))$
x^n	(24)	$\rho^n(\operatorname{ch}(n\phi) + \theta \cdot \operatorname{sh}(n\phi))$
$c \pm x$	(25)	$(c \pm \rho \cdot \operatorname{ch}(\phi)) \pm \theta \cdot \operatorname{sh}(\phi)$
cx	(26)	$c\rho(\operatorname{ch}\phi + \theta \cdot \operatorname{sh}\phi)$
$\frac{x}{c}$	(27)	$\frac{\rho}{c}(\operatorname{ch}\phi + \theta \cdot \operatorname{sh}\phi)$
$\frac{c}{x}$	(28)	$\frac{c}{\rho}(\operatorname{ch}\phi - \theta \cdot \operatorname{sh}\phi)$

Розглянемо застосування запропонованої методики з прикладу функції комплексного змінного $f(z) = z^2$ в інтервальному вигляді з аргументом z , представленим у гіперболічному вигляді. Для цього виконаємо інтервальне розширення цієї функції використовуючи співвідношення (17), (30), (37), співвідношення, наведені в табл. 2, (№2) та табл. 3 (№ №20, 21) та співвідношення (72) представимо функцію $f(z) = z^2$ у вигляді:

$$f(z) = u(x, y) + iv(x, y) = (x^2 - y^2) + 2ixy. \quad (73)$$

Подаємо дійсну частину співвідношення (73) у вигляді:

$$u(x, y) = \left[\rho^2 ch(2\phi) - \delta^2 ch(2\psi) \right] + \theta \left[\rho^2 sh(2\phi) - \delta^2 sh(2\psi) \right]. \quad (74)$$

Представимо уявну частину співвідношення (73) у вигляді:

$$v(x, y) = 2\rho\delta [ch(\phi + \psi) + \theta \cdot sh(\phi + \psi)]. \quad (75)$$

Прийmemo, що:

$$\begin{cases} \rho^2 ch(2\phi) - \delta^2 ch(2\psi) = a \\ \rho^2 sh(2\phi) - \delta^2 sh(2\psi) = b \end{cases}. \quad (76)$$

Використовуючи (76) напишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \gamma \cdot ch\eta = a \\ \gamma \cdot sh\eta = b \end{cases}. \quad (77)$$

Розв'язуючи систему (77) відносно γ і η визначим корені системи (77), величини $\hat{\gamma}$ і $\hat{\eta}$.

Аналогічно перетворимо відношення (75):

$$\begin{cases} 2\rho\delta \cdot ch(\phi + \psi) = c \\ 2\rho\delta \cdot sh(\phi + \psi) = d \end{cases}. \quad (78)$$

Використовуючи (78), запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \mu \cdot ch(\omega) = c \\ \mu \cdot sh(\omega) = d \end{cases}. \quad (79)$$

Вирішуючи систему (79) щодо μ і ω визначимо її коріння: величини $\hat{\mu}$ та $\hat{\omega}$. Тоді співвідношення (73) набуде вигляду:

$$f(z) = \hat{\gamma} [ch(\hat{\eta}) + \theta \cdot sh(\hat{\eta})] + i [\hat{\mu} (ch(\hat{\omega}) + \theta \cdot sh(\hat{\omega}))]. \quad (80)$$

Співвідношення (80) дозволяє отримати функцію інтервальної комплексної змінної, еквівалентну вихідної, та придатної для подальшої роботи з комплексними функціями та числами, представленими в гіперболічній формі.

Для отримання значень кругових та гіперболічних функцій, зазначених у табл. 3, можна використовувати калькулятор, описаний у [4], з урахуванням співвідношень (73), або розкладання цих функцій у степеневі ряди.

Розглянемо часткову суму ряду виду:

$$S = \sum_{k=1}^n \left[\beta_k (\rho^k (ch(k\phi) + \theta \cdot sh(k\phi))) \right]. \quad (81)$$

та позначимо величини:

$$p = \sum_1^k \beta_k \rho^k ch(k\phi), \quad q = \sum_1^k \beta_k \rho^k sh(k\phi) \quad (82)$$

та отримаємо величину часткової суми цього ряду у вигляді інтервального числа, визначеного в гіперболічній формі:

$$w = \mu (ch\gamma + \theta \cdot sh\gamma), \quad (83)$$

де величини μ та γ корені системи:

$$\begin{cases} p = \mu \cdot ch(\gamma); \\ q = \mu \cdot sh(\lambda). \end{cases} \quad (84)$$

розв'язаної відносно μ та γ .

Детальний розгляд цих перетворень для функцій, зазначених в табл. 2, виходить за рамки даного повідомлення та має стати предметом подальших досліджень.

Висновки

1. Наведено відомості про інтервальні числа, представлені в класичному вигляді, системі ЦЕНТР - РАДІУС і в гіперболічному вигляді. Запропоновано правила переходу від однієї з форм подання інтервальних чисел до інших. Наведено відомості про комплексні інтервальні числа, дійсна і уявна частина яких представлені в гіперболічному вигляді.

2. Описано правила виконання основних арифметичних дій з цими числами та обчислення інтервальних значень показникової, логарифмічної, прямих та обернених тригонометричних, прямих та обернених гіперболічних функцій.

3. Для функцій комплексного змінного наведено відомості про їхню дійсну та уявну частину. Перелік функцій відповідає функціям комплексного змінного, що входять до системи EXCEL.

4. Отримані співвідношення для визначення дійсної та уявної частини функцій секансу, косекансу, тангенсу та котангенсу для кругових тригонометричних та гіперболічних функцій, які були відсутні у найбільш поширеній довідковій літературі.

5. Наведено приклади, що ілюструють застосування запропонованої методики.

REFERENCES

- Podzharenko, V.O., Vasilevskiy, O.M. and Kucheruk, V.Yu. (2008), *Opratsiuvannia rezultatsiv vymiriuvan na osnovi kontseptsii nevyznachenosti: navchalnyi posibnyk [Developing measurement results based on the concept of uncertainty: a textbook]*, VNTU, Vynnytsa, 158 p.
- Alefeld G., and Herzberger, Yu. (1987), *Vvedenie v interval'nye vychisleniya. [Introduction to interval calculations]*, Mir, Moscow, 360 p.
- Zhukovska, O. A. (2009), *Osnovy interval'nogo analizu: navchalnyi, [Fundamentals of interval analysis]*, Osvita Ukrainy, Kyiv, 136 p.
- Dubnickij, V.Ju., Kobylin, A.M., and Kobylin O.A. (2017), "Vychislenie znachenij jelementarnyh i special'nyh funkcij s interval'no zadannym argumentom, opredeljonnyh v sisteme Centr-Radius" [Calculation of the values of elementary and special functions with an interval-set argument defined in the Center-Radius system], *Applied radio electronics*, No. 3, pp. 147-155.
- Dubnickij, V.Ju., Kobylin, A.M. and Kobylin, O.A. (2019), "Calculation of similarity indicators and numerical integration of the criteria of similarity intervally defined in the Center-Radius system", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 55-62, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.08>.

6. Dubnitsky, V.Yu., Kobylin, A.M. and Kobylin, O.A. (2010), "Intervalnoe ocenivanie parametrov dlja opredelenija nadjozhnosti programmnoho obespechenija" [Interval estimation of parameters to determine software reliability], *Bionics of intelligence*, No. 1 (72), pp. 43-49.
7. Dubnytskyi, V.Yu., Kobylin, A.M. and Kobylin, O.A. (2020), *Software system for operational evaluation of the interval efficiency of bank conversion operations intended for mobile devices on the Android operating system*, computer program, Certificate of copyright registration for the work, No. 101306, December 17, 2020.
8. Kobylin, A.M., Dubnytskyi, V.Yu., Kobylin, O.A., Stiahlyk, N.I. and Vakulenko, N.O. (2021), *A software system for operational assessment of the interval efficiency of currency operations, designed for mobile devices*, Certificate of copyright registration for the work, No. 108729, October 20, 2021.
9. Svezhenceva, O. V. and Umnova, M. O. (2015), "Raschet ustanovivshisja rezhimov radial'noj jelektricheskoy seti na naprazhenii 0,4 kv interval'nym metodom" [Calculation of steady-state regimes of a radial electrical network at a voltage of 0.4 kV by the interval method], *Bulletin of the Irkutsk State Technical Universit*, No. 3 (98), pp. 215-222.
10. Kryukov, A V. and Litvintsev, A.I, (2013), "Interval'noe modelirovanie avariynih rezhimov jelektrojenergeticheskikh system" [Interval simulation of emergency modes of electric power systems], *Systems Methods Technologies*, No. 4 (20), pp. 73-79.
11. Hadetska, S.V., Dubnytskyi, V.Yu., Kushneruk, Yu.I., and Khodyriev, O.I. (2022), Performing basic arithmetic operations with complex numbers, which are presented in interval hyperbolic form, *Advanced Information Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 104-113, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.17>.
12. Kalmykov, S.A., Shokin, Ju.I. and Juldashv, 3.X. (1986), *Metody interval'nogo analiza* [Methods of interval analysis], Nauka, Novosibirsk, 1986. 223 p.
13. Sharyj, S.P. (2012), *Konechnomernyj interval'nyj analiz* [Finite-Dimensional Interval Analysis], XYZ, Novosibirsk, 606 p.
14. Dubnitsky, V.Yu., Kobilin, A.M., Kobilin, O.A. and Kushneruk, Yu.I.n(2021), "EXCEL-oriented procedure for calculating the values of special functions with an interval argument, given in hyperbolic form.", *Advanced Information Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 116-123, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4>.
15. Molodtsov, D. A. and Kovkov, D. V. (2011), "Vvedenie v teoriyu priblizhennyh chisel" [Introduction to the theory of approximate numbers], *Bulletin of the Tver State University. Series: Applied Mathematics*, No. 23, pp. 111-128.
16. Spivak, I. Ya. And Krepych, I. Ya. A. (2019), "Prykladni aspekty intervalnykh obchyslen: navchalnyi posibnyk" [Applied aspects of interval calculations: a study guide], Palanytsia FOP, Ternopil, 153 p.
17. Kononyuk, A. E. (2011), "Dyskretno-nepreryvnaia matematika. Alhebry. K.4.Ch.2." [Discrete-continuous mathematics. Algebras. K.4.Part 2], Education of Ukraine, Kyiv, 668 p.
18. Smirnova, E. N. and Maksimenko N. V. (2015), *Jelementy interval'nogo analiza: metodicheskie ukazaniya* [Elements of interval analysis: guidelines], Orenburg State University, Orenburg, 62 p.
19. Verbitsky, I. L., and Fainberg, E. D. (1989), *Jelementy teorii funkcij kompleksnogo peremennogo* [Elements of the theory of functions of a complex variable], UZPI, Kharkiv, 135 p.
20. Serogodsky, V. V., Finkov, M. V., Kozlov, D. A., Prokdi, R. G. et al. (2017), *Excel 2016. Polnoe rukovodstvo* [Excel 2016, Complete guide], Nauka i tehnika, 412 p.
21. Korn, G., and Korn, T. (1968), "Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov" [Handbook of mathematics for scientists and engineers], Science, Moscow, 720p.
22. Bronstein, I.N. and Semendyaev, K.A. (1981), "Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchaschchikhsya vtuzov" [Handbook of mathematics for engineers and students of higher educational institutions], Nauka, TPN, Moscow, 719 p.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поджаренко В.О, Васілевський О.М., Кучерук В.Ю. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. 158 с.
2. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. Москва: Мир, 1987. 360 с.
3. Жуковська О. А. Основи інтервального аналізу: навчальний посіб. Київ: Освіта України, 2009. 136 с.
4. Дубницький В. Ю., Кобылин А. М., Кобылин О. А. Вычисление значений элементарных и специальных функций с интервально заданным аргументом, определённым в системе ЦЕНТР – РАДИУС. *Прикладная радиоэлектроника*. 2017. Том 16, № 3, 4. С. 147-154.
5. Дубницький В.Ю., Кобылин А.М., Кобылин О.А. Вычисление индикаторов подобия и численное интегрирование критериев подобия, интервально определённых в системе ЦЕНТР-РАДИУС. *Сучасні інформаційні системи*, 2019. Т. 3, № 3. С. 55 – 62. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.08>.
6. Дубницький В.Ю., А.М. Кобылин А.М., О.А. Кобылин О.А. Интервальное оценивание параметров для определения надёжности программного обеспечения. *Бионика интеллекта*. 2010. № 1 (72). С. 43-49.
7. Дубницький В.Ю., Кобилін А.М., Кобилін О.А. Програмна система оперативної оцінки інтервальної ефективності банківських конвертаційних операцій, призначених для мобільних пристроїв на операційній системі Android: Комп'ютерна програма. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 101306 від 17 грудня 2020 р.
8. Кобилін, А.М., Дубницький, В.Ю., Кобилін, О.А., Стяглик, Н.І., Вакулєнко, Н.О. Програмна система оперативної оцінки інтервальної ефективності валютних операцій, призначена для мобільних пристроїв : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 108729 від 20 жовтня 2021 р.
9. Свеженцева О. В., Умнова М. О. Расчет установившихся режимов радиальной электрической сети на напряжении 0,4 кв интервальным методом. *Вестник Иркутского Государственного техн. университета*. 2015. №3 (98). С. 215-222.
10. Крюков А В., Литвинцев А И Интервальное моделирование аварийных режимов электроэнергетических систем. *Системы Методы Технологии*. 2013. № 4 (20). С. 73-79.
11. Гадецька С.В., Дубницький В.Ю., Ю. І. Кушнерук Ю.І., Ходирев О.І. Виконання основних арифметичних дій з комплексними числами, які представлено в інтервальній гіперболічній формі. *Сучасні інформаційні системи*. 2022. Т. 6, № 1. С.104-113. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.17>.
12. Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев 3. X. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986. 223 с.
13. Шарый С. П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: XYZ, 2012. 606 с.

14. Дубницький В. Ю., Кобилін А. М., Кобилін О. А., Кушнерук Ю. І. EXCEL-орієнтована процедура для обчислення значень спеціальних функцій з інтервальним аргументом, заданим в гіперболічній формі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 4. С. 116-123. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4>.
15. Молодцов Д. А., Ковков Д. В. Введение в теорию приближенных чисел. *Вестник Тверского Государственного Университета. Серия: Прикладная математика*. 2011. № 23) С. 111-128.
16. Співак І. Я., Крепич І. Я Прикладні аспекти інтервальних обчислень: навчальний посібник. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 153 с.
17. Кононюк А. Е. Дискретно-непрерывная математика. Алгебры. К.4.Ч.2. К.4: Київ: Освіта України, 2011. 668 с.
18. Смирнова, Е. Н., Максименко Н. В. Элементы интервального анализа: методические указания. Оренбург: Оренбургский государственный университет. 2015. 62 с.
19. Вербицкий И. Л., Файнберг Е. Д. Элементы теории функций комплексного переменного. Методическое пособие. Харьков: УЗПИ. 1989. 135 с.
20. Excel 2016. Полное руководство / Серогодский В. В., Финков М. В., Козлов Д. А., Прокди Р. Г. и др. Санкт-Петербург: Наука и техника, 2017. 412 с.
21. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва: Наука. 1968. 720 с.
22. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Москва : Наука, Лейпциг: Гойбнер, 1981. 719 с.

Received (Надійшла) 18.05.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Дубницький Валерій Юрійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник ННІ “Каразінський банківський інститут” ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

Valeriy Dubnitskiy – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Senior Research of “Karazin Banking Institute” of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: dubnitskiy@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1924-4104>.

Кобилін Анатолій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та математичного моделювання, ННІ “Каразінський банківський інститут” ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

Anatolii Kobylin – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of “Karazin Banking Institute” of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: anatoliy_kam@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8083-0762>.

Кобилін Олег Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleg Kobylin – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Head of the Department of Informatics, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleg.kobylin@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0834-0475>.

Кушнерук Юрій Іонович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Інституту цивільної авіації Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Yuriy Kushneruk – Candidate of Technical Sciences Associate Professor, Senior Lecturer of the Civil Aviation Institute of Ivan Kozhedub ,Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

e-mail: yuriy.kushneruk@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5844-7137>.

Шевяков Юрій Іванович – доктор технічних наук, професор, директор Інституту цивільної авіації Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Iurii Sheviakov – Doctor of Technical Sciences, Professor Director of the Civil Aviation Institute of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

e-mail: shieff59@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5322-6674>.

Calculation of the value of the functions of the complex variable with by an interval argument, we will design in the hyperbolic form

Valeriy Dubnitskiy, Anatolii Kobylin, Oleg Kobylin, Yuriy Kushneruk, Iurii Sheviakov

Abstract. Information about the interval numbers presented in the classical form, the CENTER-RADIUS system and in the hyperbolic form is given. Rules for the transition from one of the forms of representation of interval numbers to others are proposed. Information is given on complex interval numbers, the real and imaginary parts of which are presented in hyperbolic form. The rules for performing basic arithmetic operations with these numbers and the calculation of interval values of power, exponential, logarithmic functions, direct and inverse trigonometric functions, direct and inverse hyperbolic functions are described. For functions of a complex variable, information about their real and imaginary parts is given. The list of functions corresponds to the functions of a complex variable included in the EXCEL system. Relationships are obtained for determining the real and imaginary parts of the secant, cosecant, tangent and cotangent functions for circular trigonometric and hyperbolic functions, which were absent in the most common reference literature. It is shown that the operations of multiplication, division and raising to an integer power are most appropriate to perform with complex interval numbers, which are defined in hyperbolic form. The operation of calculating the root of degree n from an interval complex number presented in hyperbolic form is most expediently performed using the CENTER-RADIUS system in combination with the hyperbolic form of representing the interval number. Relationships are obtained that make it possible to obtain a function of an interval complex variable equivalent to the original one and suitable for further work with complex functions and numbers presented in hyperbolic form and in the CENTER-RADIUS system. Examples illustrating the application of the proposed technique are given.

Keywords: interval calculations; functions of a complex variable; complex interval numbers.

Oleksii Kolomiitsev¹, Volodymyr Komarov², Oleh Dmitriiev³, Volodymyr Pustovarov⁴, Ruslan Oliinyk⁵

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

²Central research institute of armament and military technique of Military Powers, Kyiv, Ukraine

³Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine

⁴Kharkiv representative office of the general customer – the State Space Agency, Kharkiv, Ukraine

⁵SR Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Chernihiv, Ukraine

EXPERIMENTAL UNIT FOR DETERMINING BODY WEIGHT OF ASTRONAUTS AND LIGHT-WEIGHT OBJECTS IN ZERO-GRAVITY CONDITIONS

Abstract. The transition of an astronaut into zero gravity leads to a certain restructuring of the body, including the redistribution of fluid flows in it. The process of dehydration of the body is stimulated, the astronaut loses weight. Knowledge of the regularities of changes in an astronaut's body weight, keeping it within normal limits thanks to a rational load distribution, rest, physical exercises, and a well-thought-out diet are extremely necessary in order to provide the astronaut with the most favorable conditions for adaptation in zero gravity, as well as to better prepare him for his return to Earth. Returning materials for scientific research and experiments, as well as equipment, from the space station to Earth also requires high-precision determination of the low weight of objects. **The object of the research** is an experimental unit that allows measuring the weight (parameters) of the astronaut's body and the small weight of objects (equipment, devices, etc.) that oscillate. **The subject of research** is the frequency of natural oscillations of the dynamic system. **The purpose of scientific work** is the development of an experimental unit for determining the weight of the astronaut's body and the low weight of objects in zero gravity. **Conclusions.** An experimental setup for determining the body weight of astronauts and the low weight of objects (control objects – CO) in zero gravity is proposed. For high-precision determination of the weight of the CO in zero gravity, the natural frequency (NF) was chosen as a diagnostic parameter. In the experimental installation, the weight of the OC is determined by changing the NF of the dynamic system "control object – moving anchor" depending on the attached weight of the CO. The essence of the work of the experimental unit is revealed, and its general appearance and structural scheme are presented.

Keywords: zero gravity; astronaut's body weight; low weight of objects; object control; experimental setup; natural frequency; dynamic system.

Introduction

It is known that the weight of an object (body) arises as a result of the Earth's gravity, but may differ in magnitude from the force of gravity. In particular, the ratio between the gravity force acting on an object and the weight of the object changes as soon as the support (ground) begins to move up or down. In this case, the weight of the object will not be equal to the force of gravity.

Consequently, the state of a body (astronaut or object) in which it has no weight is called zero gravity (zero-gravity). This state occurs when the body and the support on which it is located are free-falling. In a free fall of a body with a support, there is no interaction between them, the body does not press against the resistance and no deformation occurs, and therefore there is no reaction force of the support and the weight of the body.

The state of zero gravity occurs in astronauts and objects on board of a spaceship with the engines turned off, as a result of which they float freely in the cabin (Fig. 1). At the same time, the bone density of astronauts in the state of zero gravity decreases by more than 1 % per month. For comparison, the loss of bone weight in old age is from 1 % to 1,5 % per year.

Astronauts in zero gravity do not exert much effort, which causes muscles to lose strength quickly over time. Stamina and volume, respectively, change the weight of astronauts.

In addition, the return from orbit to Earth of research and experimental materials, as well as

malfunctioning equipment, all require highly accurate weight determination.

Consequently, determining the weight of the astronaut's body and the small weight of objects (equipment, devices, etc.) in zero gravity is an urgent scientific and practical task.

Thus, it is necessary to develop an experimental setup for high-precision determination of the astronaut's body weight and small weight of objects (equipment, devices, etc.) in zero gravity.



Fig. 1. Astronaut and objects in a state of zero gravity on the ISS

Research results

The choice of this parameter for other parameters is due to the fact that it is easier to analyze the parameters that characterize the elastic oscillatory motion of the dynamic system – dynamic parameters.

The greatest information about the state of the dynamic system is carried by the following parameters,

included in the vector of analyzed dynamic characteristics:

- frequency of natural (auto-resonant) oscillations (ω);
- logarithmic decrement of oscillation (δ);
- absorption coefficient (ψ);
- kinematic characteristics of oscillatory motion (displacement, velocity, acceleration);
- a number of parameters of nonlinear vibrations;
- resonance amplitudes.

The selected control parameters in total contain complete information about the specifications of the dynamic system. However, the practical implementation of all these parameters to determine the specifications of the dynamic system is associated with a number of important difficulties.

First of all, it is the complexity associated with the control and the equipment used, its large weight and dimensions. Application of this equipment requires significant labor costs and time to perform a given volume of tests, conditions of its placement on board of the orbital station, where the amount of living space is limited. The degree of influence of parameters of the control object (CO), associated with the dynamic system on the specifications of the output signals will be different. In this regard their definition will be complicated. And this, in turn, will affect the information value of the output signals.

Therefore, in practice it is necessary to use the parameter, which is able to carry the most information about the oscillating system. Auto-resonant oscillations can be used as such parameter.

Agitated in an appropriate way (non-contact method) undamped harmonic oscillations of the dynamic system with natural frequency (NF) can be perceived by oscillation sensors and converted into an output signal acceptable for the perception of control equipment (peripheral device).

In case of harmonic auto-resonance agitation of oscillations the stability of vibrating system can be assured by magnetodynamic compensation of application of dissipative forces, and linearity of elastic characteristics of oscillating system – by selection of appropriate level of agitation.

Consequently, only the NF can be used as a diagnostic parameter, because in comparison with other characteristics it has the following advantages:

- high stability;
- ease of measurement;
- high accuracy of its measurement (with an error margin not exceeding $\pm 0,01$ %).

NF, as a defined control parameter, meets the requirements of operability to the highest degree. On the modes of self-oscillation such characteristics as NF can be obtained more easily.

Judging by changes in the NF spectrum, we can immediately answer the question, for example, in regard to changes in the weight characteristics of the dynamic system "control object – moving anchor". The spectrum of NF can be increased by changing the stiffness of the elastic elements that make up the dynamic system "object of control-moving anchor".

The essence of the NF control method used to determine the body weight of the astronaut and low weight in zero-gravity [13] is based on the change of parameters of natural vibrations of dynamic system (natural frequency and amplitude) from the weight of CO attached to it.

In each given case, the behavior of the dynamic system of the experimental setup during free harmonic oscillations characterizes its dynamic individuality. It consists in the inherent distribution of weight and stiffness characteristics.

The attached to the "movable anchor" CO having the corresponding weight and increasing the rigidity parameters of the dynamic system by compression of the elastic elements (springs), entails the change in the properties of vibrations of the dynamic system.

Provided that the initial value of NF for the dynamic system of the experimental setup without the attached weight of the CO at certain values of compression of the elastic elements of this system is known, then by measuring the NF during the control of the object weight and comparing them with the calibration graphs obtained earlier with the reference ones, we can determine the OC weight.

The experimental setup for determination of an astronaut's body weight and small weight of objects in zero-gravity conditions is intended both for weight determination in normal (terrestrial) conditions and in zero-gravity conditions (including space orbital stations or special-purpose aircraft in orbital flight).

Determination of weight is carried out by changing the NF of the dynamic system "control object-moving anchor" depending on the attached weight of the OC (study).

The received information about the NF is output to the electronic frequency counter (EFC) for subsequent data entry into the computer. The dynamic characteristics of the system in the computer are translated into the dimensions of the weight with subsequent output of the information to the peripheral device (for example, to the control and recording equipment).

The general appearance of the experimental installation is shown in Fig. 2, 3, and its structural diagram is shown in Fig. 4.

Constructive implementation of an experimental unit for determining the weight of the astronaut's body and the low weight of objects in zero gravity. The experimental unit (Fig. 4) consists of the following main parts:

- housing with auxiliary structural elements;
- magnetodynamic oscillation agitation system made in the form of electromagnets (EM);
- a movable ferromagnetic anchor with a fixed permanent magnet (N/S);
- induction sensors;
- base (for mounting the control object);
- elastic elements (EE).

Composition of the experimental unit. Structurally, the experimental setup also includes an EFC (for recording the NF of the dynamic system), a computer and a low-frequency amplifier (LFA).

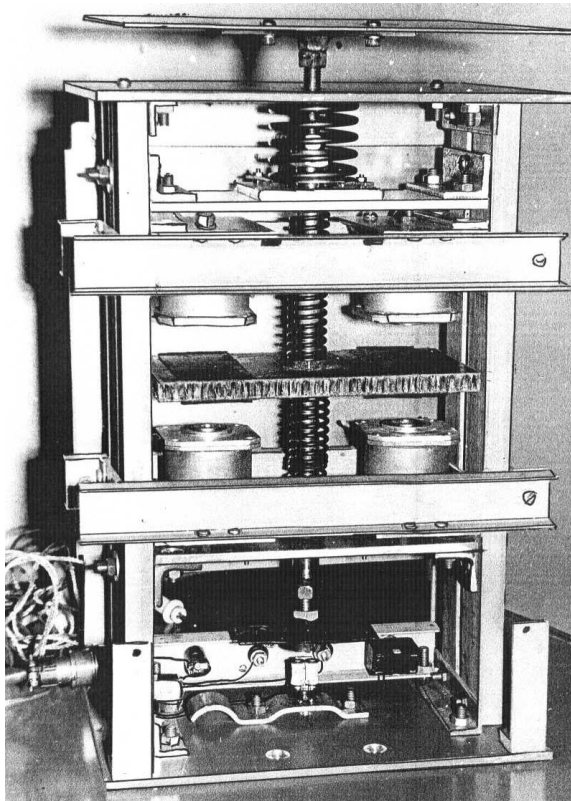


Fig. 2. General view of the experimental unit (with the back cover removed)

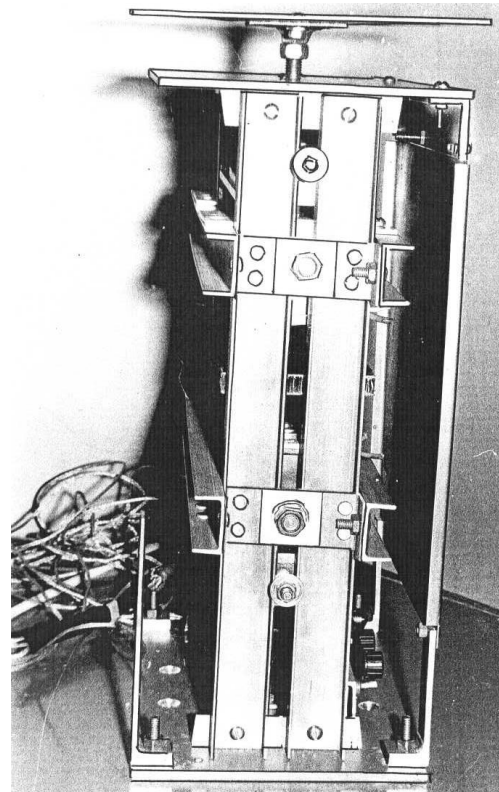


Fig. 3. General view of the experimental unit (with the side cover of the case removed)

The case with auxiliary structural elements (on which EMs are attached), elastic elements (springs), a movable ferromagnetic anchor with a permanent magnet attached to it, an induction sensor located in the magnetic field zone of the permanent magnet, form a device for determining the weight of the attached CO. The auxiliary design elements of the experimental setup, which are designed to move the EM relative to the ferromagnetic

linings of the "moving anchor", change the gap between them by compressing the springs, which ensures an increase in the stiffness of the dynamic system.

EFC (and computer) constitute a system of control and recording equipment and information (Fig. 4).

Structural and composition scheme of the experimental unit. The structural and composition scheme of the experimental unit is shown in Fig. 5.

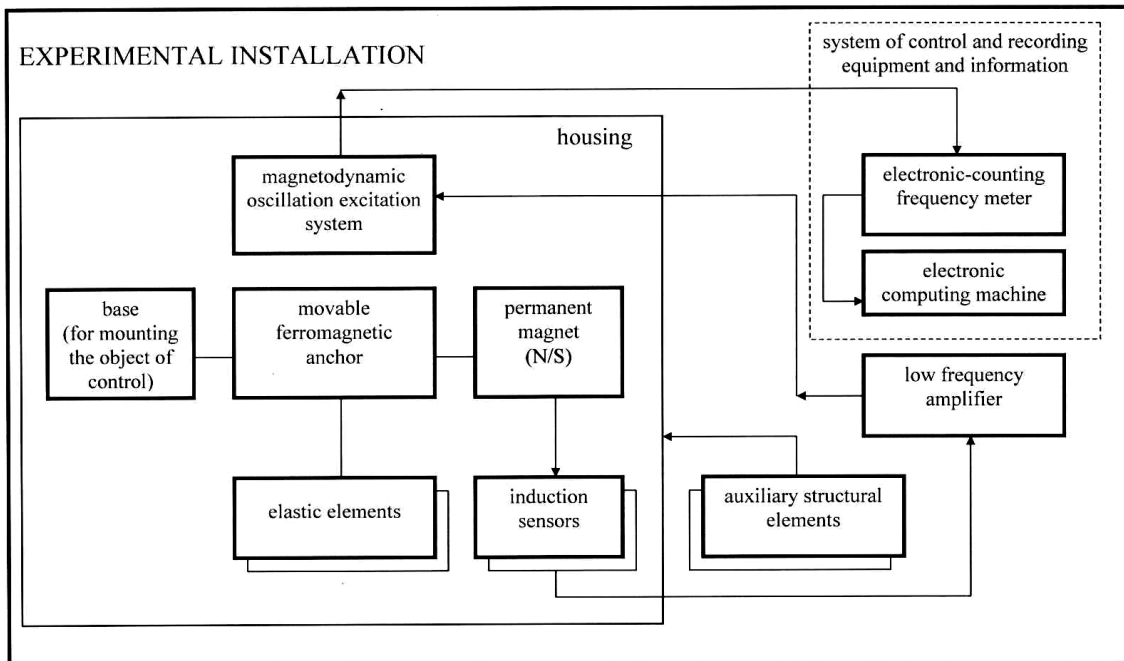


Fig. 4. Structural diagram of the experimental unit

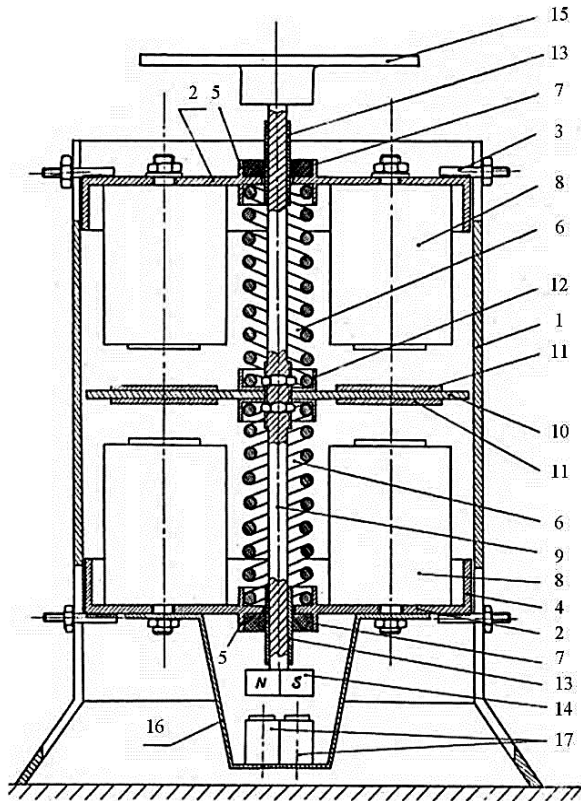


Fig. 5. Structural and composition scheme (variant) of the experimental unit

Design of the experimental unit. The experimental unit consists of (Fig. 5): the body (1) and the movable covers (2) with the fixing nodes (3) of the covers passing through slots in the body (1). Each cover (2) has a flap (4) to ensure the possibility of moving the cover (2) inside the body (1) without distorting it. Ring stiffeners (5) on cover (2) form limiters for springs (6) and a place for installing a fluoroplastic gasket (7). To the inner part of the cover (2) (in the plane passing along the longitudinal axis of the cover (2) through its geometric center "GC"), two EM (8) (which are combined into a block) are attached by means of screw fasteners, which are located inside the case (1) axisymmetric with respect to one another, relative to the longitudinal axis ("LA") of cover (2) and its geometric center ("GC") (Fig. 6).

In the geometric center "GC" of the cover (2), a hole is made (Fig. 6), through which the rod (9) passes, which has a thread cut in the central part for fastening a non-magnetic plate (10) to the rod (9) using self-locking nuts. On both surfaces of the plate (10), ferromagnetic pads (11) and limiters (12) for springs (6) are rigidly fixed (limiters (12) are ring-type).

The limiters (12) simultaneously serve to exclude the skewing of the plane of the non-magnetic plate (10) relative to the longitudinal axis ("LA1") of the rod (9) (withholding an angle of 90°). Bronze bushings (13) are mounted on the ends of the rod (9) with tension (which, when in contact with fluoroplastic gaskets (7), provide a minimum coefficient of friction between them).

A permanent magnet (14) is attached to the lower end of the rod (9), and a base ("plate 15") is attached to the upper end, which is intended for mounting the

control object. A cup (16) is attached to the outer side of the lower cover (2), inside which an electromagnetic induction displacement sensor (17) (hereinafter referred to as the sensor) is placed, the output of which is connected to a low-frequency amplifier (13) (LFA) (absent in Fig. 5, see block scheme in Fig. 7).

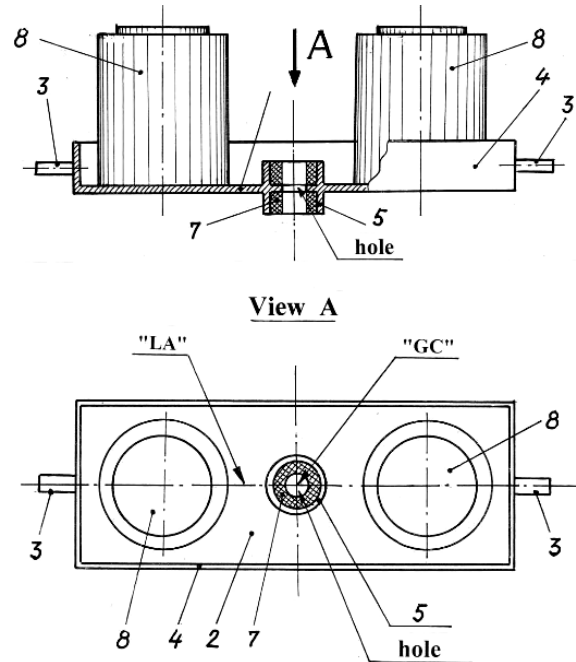


Fig. 6. A chart of fixing of electromagnets is on a lid

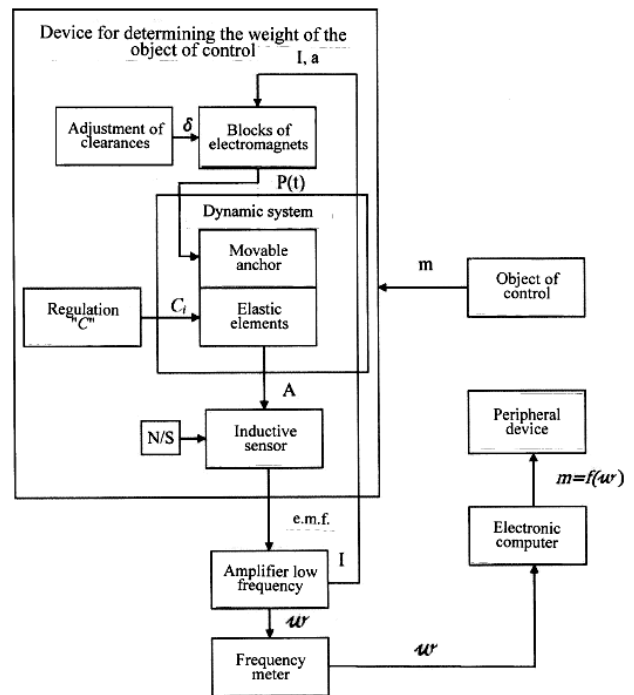


Fig. 7. Block scheme of the experimental unit

Purpose of the components of the experimental unit and their role in ensuring its operation. The rod (9) is designed to ensure the movement of the plate (10) between the EM blocks (8).

The rod (9) (with the plate (10) rigidly fixed on it) with springs (6) (of the same stiffness) located between

the immovably fixed covers (2), axially symmetrical to each other and relative to the longitudinal axis "LA1" of the rod (9), create a dynamic system – the above-mentioned "moving anchor" (Fig. 4).

The electromagnetic induction sensor (17) of movement is designed to create an electromotive force (EMF) with subsequent transmission of a useful signal to the input of the LFA.

The sensor unit (17) is located in the field of a permanent magnet (14) (N/S), which has the ability to move together with the rod (9) in the vertical direction along the longitudinal axis of the housing (1).

The sensor unit (17) is a feedback sensor, the output signal of which is proportional to the speed of movement of the "moving anchor". Some non-linearity between the voltage removed from the sensors (17) and the force developed by the EM (8) occurs due to the fact that the force of the EM (8) is proportional to the gap between the "moving anchor" and the stationary parts of the magnetodynamic system. This helps to stabilize the amplitude of oscillations. Thanks to this, during the long-term operation of the MDOA system, an unlimited increase in the amplitude of oscillations is not observed.

With an increase in NF (with a change in the tension of the spring (6) – "EE"), the inductive resistance of the coil of the electromagnetic induction sensor (17) increases. This leads to a decrease in the useful signal that is taken from said sensor (17). To eliminate this phenomenon, the sensor (17) is moved towards the permanent magnet (14) (N/S) by reducing the gap between them.

Approaching the sensor (17) to the permanent magnet (14) (N/S) leads to an increase in the amplitude of the signal taken from the sensor (17) and, accordingly, to an increase in the power generated by the LFA.

The system of magnetodynamic agitation of oscillations (MDOA) is designed to disrupt the cyclic oscillations of a dynamic system with its own (self-resonant) frequency.

A feature of the MDOA system is that it does not have direct contact with the moving ferromagnetic armature and the ferromagnetic pads (11) fixed to it, and thus the influence of the excitation system on the NF of the dynamic system (DS) is excluded.

The MDOA system works as follows (Fig. 5). The electromagnetic induction sensor (17), fixed in the cup (16) on the lower cover (2), is in the field of the permanent magnet (14) (N/S). When the oscillations of the "moving anchor" are forced into agitation, an electromotive force (EMF) is induced in the induction sensor (17), due to which the bridge becomes unbalanced, and current begins to flow in the input circuits of the differential amplifiers of the LFA. Moreover, the law of its change corresponds to the law of oscillations of the "moving anchor". Next, the signal is fed to the input of the LFA, in which it is amplified. At the output of the LFA, the signal changes relative to the signal at the LFA input by 180°.

The LFA is designed to convert the signal coming from the induction sensor (17) into an electric current intended for interrogating EM coils (8). The LFA

operating mode is selected in such a way that it responds only to an additional half-wave of the signal from the electromagnetic sensor (17). In this way, the moving ferromagnetic anchor (dynamic system as a whole) is loaded with the frequency of its own (self-resonant) oscillations.

The EM (8) block is designed to create an electromagnetic field and transmit its forces to the ferromagnetic pads (11). The EM (8) block, which is fixed on the cover (2), with the help of auxiliary structural elements, namely, the fixing nodes (3), has the ability to move (together with the covers (2)) along the guides of the housing (1) to change the gap between the ferromagnetic pads (11), rigidly fixed on the upper and lower surfaces of the non-magnetic plate (10) of the "moving anchor", and the indicated electromagnets (8).

The design of the experimental setup provides for the adjustment of the frequency of oscillations and, accordingly, the amplitude of oscillations by changing the gaps between the EM (8) blocks and the ferromagnetic pads (11) of the "moving anchor".

The dynamic system (DS) is designed to receive the excitation force from the EM (8) blocks and create undamped mechanical oscillations of the "moving anchor" with the CO fixed on it, and in-phase electrical oscillations in the "ID-NF-EM" system, the frequency of which is exactly equal to the NF of the system "the object of control - moving anchor". The peculiarity of the DS is that it does not have direct contact with sources of agitation power – EM (8), the influence of the excitation system on the DS is excluded (lack of influence on the NF).

The principle of operation of the DC is based on the fact that during mechanical oscillations of the movable ferromagnetic armature, which rests symmetrically on elastic elements (the role of which is performed by metal springs 6), the change in the weight of the dynamic system due to the connection of the CO will lead to a proportional change in the NF of the DC.

The use of springs 6, as an elastic element, will allow to change the dynamic response of the DC in the process of compression of the springs 6. Based on this, the formed self-oscillating system will change the NF not only due to the attached weight of the CO by an amount that is proportional to this weight, but also directly proportional to the stiffness of the elastic element (EE) 6 and its static deformation.

Structurally, the DS consists of a "moving anchor" on which ferromagnetic pads (11) in the form of plates are fixed, and EE (6), the role of which is performed by metal springs located symmetrically relative to the non-magnetic plate (10) and having the same characteristics. The characteristics of EE (6) are given in coordinates (w/m). One end of the springs (6) rests against the non-magnetic plate (10) of the "moving anchor", and the other end - against the cover (2), with the help of which (by moving it along the longitudinal axis "LA1" of the body (1)) it is possible to change the amount of their static deformation. At the upper end of the rod (9) of the "moving anchor" is fixed the base – the "plate" (15), to which the CO is attached, and at the lower end of the rod (9) - the permanent magnet (14) (N/S).

On the upper and lower ends of the rod (9) of the "moving anchor" with tension, bronze bushings (13) are planted, which have frictional contact with the fluoroplastic gasket (7), which is placed in the ring (5). It is the combination of such a pair of elements that rub against each other, namely, "bronze – fluoroplastic" gives a minimum coefficient of friction, which gives a minimum error when measuring the NF of DS.

The main link of the DS is elastic elements - metal springs (6), which have constant stiffness.

During DC oscillations, the permanent magnet (14) (N/S), fixed at the lower end of the rod (9) of the "moving anchor", will cyclically approach the sensor (17) (fixed in the body of the cup (16)), in the windings of which a signal will be induced in the form of EMF induction. This signal in the form of EMF induction is amplified in the LFA and is fed to the EM block (8), which, acting on the ferromagnetic pad (11) of the "moving anchor" with an agitating force $P(t)$, promotes the movement of the latter in the direction of action of the agitating force $P(t)$ (Fig. 7).

While moving, the "moving anchor" compresses the spring (6). Having reached the equilibrium position, when the agitating force $P(t)$ will be equal to the elastic force of the spring (6), the structure ("moving anchor" with the CO placed on the "plate" (15)) will begin to return to the original equilibrium position under the action exerted by the elastic forces of the spring (6). The EMF in the sensor coil (17) changes its sign to the opposite and, after amplification in the LFA, is directed to another EM (8) block. The agitating force $P(t)$, which will originate from this other EM (8) block, will move the "moving anchor" with the CO fixed on the "plate" (15), in the other direction – opposite to the first half-period of oscillations. Non-damping mechanical oscillations of the structure arise with the NF corresponding to the weight of the original DS with the attached CO. The specified oscillations will correspond to the initial value of the NF of the dynamic system (with the attached CO) at an unchanged amount of spring tension (6).

By varying the tension force of springs (6), we obtain the dependence of the NF on the weight of the attached CO (coordinate (w/m)). However, such coordinates will be valid only for COs that have an integrity of structure – are rigid loads.

The presence of any cavities (filled with liquid filler, viscous or loose substance) or moving elements in the CO will lead to a large error in determining the actual NF.

For the removal of this defect it is necessary to boil thoroughly inflexibility descriptions of (6), that on family of curves C_i in coordinates (w/m) to get the law of change C depending on force of tightening of spring 6, id est from the increase of inflexibility of the oscillating system (DS).

By changing the tightening force of the spring (6) with the help of auxiliary structural elements (fixing

nodes (3)) by reducing the distance between the upper and lower covers (2), we change the damping properties of EE (6)). Since the DS is a frequency-selective oscillating circuit, it will enter the mode of its own (self-resonant) oscillations again, but with a frequency greater than the previous one, with the same attached CO weight.

By varying the tightening force of the springs (6), it is possible, for the same CO weight (known, used as reference) to obtain a family of curves C_i in coordinates w/m , where m – reference weight; C_i – stiffness EE.

In the process of frequency control measurements, according to the data $w = m$, it is possible to determine the weight of the CO.

If, as a result of the measurements, no dispersion of the NF value is found, this indicates that the CO has no elements capable of damping oscillations (i.e. there are no cavities with a liquid filler, viscous or loose substance, internal cantilever-fixed nodes (which can oscillate relative to places of attachment) or elements that can move when the position of the CO relative to the static one changes).

Thus, the experimental setup ensures the inclusion of the CO (its weight) in the self-oscillating system. In this system, a movable ferromagnetic anchor (with the CO attached), resting on elastic elements, plays the role of a resonant high-Q circuit. At the same time, there is no need for elements that require manual adjustment, and the accuracy of measuring such a dynamic characteristic as NF is significantly increased.

The NF parameters are recorded by the ЧЗ-32 (CHZ-32) type EFC, the information from which is fed (when used on board of a space station) to a computer for conversion into weight dimensions and display of control results on peripheral devices.

Conclusions

Thus, an experimental unit was created and proposed for determining the body weight of astronauts and the low weight of objects in zero gravity.

NF was chosen as a diagnostic parameter for high-precision determination of the weight of CO in zero gravity.

The weight of the CO is determined by changing the NF of the dynamic system "object of control - moving anchor" depending on the attached weight of the CO.

The general view of the experimental unit and its structural diagram are presented.

The structural and compositional diagram and the block diagram of the experimental unit are presented.

The peculiarities of the operation of the MDOA and DS system are explained.

The experimental unit allows you to determine the weight of the CO and its condition (heterogeneity, presence of liquid filler, oscillating parts, etc.). The installation can be used both on orbital space stations and on Earth.

REFERENCES

1. Eiderman, V.L. (1980), *Theory of mechanical oscillations*, Higher school, Moscow, 408 p.
2. Ananiev, I.V. & Colvin, N.M. (1969), *Influence of local rigidity of rods on the frequency of natural oscillations*, AI, 120 p.

3. Mikishev, G.N. & Rabinovich, B.I. (1968), *Dynamics of a rigid body with cavities partially filled with liquid*, Mashinostroenie, Moscow, 532 p.
4. Rummyantsev V.V. (1957), "Rotation stability of a rigid body with an ellipsoidal cavity filled with liquid", *Applied mathematics and mechanics*, Vol. 21, no. 6, pp. 740-748.
5. (1980), "Vol. 3. Oscillations of machines, structures and their elements", *Vibration in technology: Handbook*, 544 p.
6. Chandaeva, S.A. (1994), *Physics and people*, AT "Aspect Press", Moscow, 136 p.
7. (2021), *Body weight and weightlessness*, available at: <http://um.co.ua/13/13-7/13-72477.html>.
8. (2021), Space scales, available at: <https://habr.com/ru/post/379349/>.
9. (2021), *How people are weighed in zero gravity on the ISS*, available at: <https://pikabu.ru/story/>.
10. (2021), *Invented a non-contact method of weighing people in zero gravity*, available at: <https://www.unn.com.ua>
11. (2021), Weightless body mass meter, available at: http://wiki-org.ru/wiki/Измеритель_массы_тела_в_невесомости.
12. Bezrodny D.A. (2017), *Gravimetry. Book 1. Theoretical foundations of gravimetry*, Taras Shevchenko National University, Kyiv, 188 p., available at: <http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/gravimetriya1.pdf>.
13. Kolomiitsev, O., Komarov, V., Dmitriiev, O., Pustovarov, V. and Oliinyk, R. (2022), "Method for controlling the frequency of eigentones for determination of the astronaut's body weight and small weight in zero gravity", *Advanced Information Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 74–81, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.12>.

Received (Надійшла) 15.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Коломійцев Олексій Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Oleksii Kolomiitsev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department «Computer engineering and programming», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Alexus_k@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8228-8404>.

Комаров Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, начальник науково-дослідного відділу Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна;

Volodymyr Komarov – candidate of technical sciences, Chief of research department, Central research institute of armament and military technique of Military Powers of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: Komarov.cndi@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4929-4527>.

Дмитрієв Олег Миколайович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри Льотної академії Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна;

Oleh Dmitriiev – Doctor of technical sciences, associate professor, the head of department, Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

e-mail: Dmitronik70@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1079-9744>.

Пустоваров Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, начальник групи Харківського представництва генерального замовника – Державного космічного агентства України, Харків, Україна;

Volodymyr Pustovarov – candidate of technical sciences, chief of group, Kharkiv representative office of general customer – the State space agency of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: pustovarov78volodymyr@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3944-5771>.

Олійник Руслан Михайлович – начальник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернівці, Україна;

Ruslan Oliinyk – Chief of Section, State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine;

e-mail: o.ruslan77@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3969-544X>.

Експериментальна установка для визначення ваги тіла космонавта та малої ваги об'єктів в умовах невагомості

О. В. Коломійцев, В. О. Комаров, О. М. Дмитрієв, В. В. Пустоваров, Р. М. Олійник

Анотація. Перехід космонавта у невагомість призводить до певної перебудови організму, у тому числі до перерозподілу у ньому потоків рідини. Стимулюється процес обезводнення організму, космонавт втрачає у вазі. Знання закономірностей змін ваги тіла космонавта, збереження її в нормальних межах завдяки раціональному, розподілу навантаження, відпочинку, фізичних вправ, продуманому режиму харчування у край необхідності, щоб забезпечити космонавту найбільш сприятливі умови для адаптації у невагомості, а також краще підготувати його до повернення на Землю. Повернення з космічної станції на Землю матеріалів наукових досліджень і експериментів, а також обладнання також потребує високоточного визначення малої ваги об'єктів. **Об'єктом дослідження** є експериментальна установка, що дозволяє вимірювати вагу (параметри) тіла космонавта і малу вагу об'єктів (обладнання, пристроїв тощо), що коливаються. **Предметом дослідження** є частота власних коливань динамічної системи. **Метою наукової роботи** є розробка експериментальної установки для визначення ваги тіла космонавта та малої ваги об'єктів в умовах невагомості. **Висновки.** Запропоновано експериментальну установку для визначення ваги тіла космонавтів (астронавтів) та малої ваги об'єктів (об'єктів контролю (ОК)) в умовах невагомості. Для високоточного визначення ваги ОК в умовах невагомості у якості діагностичного параметра обрана частота власних коливань (ЧВК). В експериментальній установці визначення ваги ОК здійснюється за зміною ЧВК динамічної системи «об'єкт контролю – рухомий якор» залежно від приєднаної ваги ОК. Розкрито сутність роботи експериментальної установки та представлено її загальний вигляд і структурна схема.

Ключові слова: невагомість; вага тіла космонавта; мала вага об'єктів; об'єкт контролю, експериментальна установка; частота власних коливань; динамічна система.

Inna Petrovska, Heorhii Kuchuk

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

STATIC ALLOCATION METHOD IN A CLOUD ENVIRONMENT WITH A SERVICE MODEL IAAS

Annotation. The article discusses a method that allows the allocation of the required computing resources for the initial launch of a virtual host. The method is focused on the functioning of a virtual host in a cloud environment focused on the service model "Infrastructure as a Service". The subject of research is the methods of static resource allocation in cloud environments. The object of study is the process of functioning of a virtual host in a cloud environment that provides all information technology resources for it. The purpose of the study is to develop a method for the static allocation of resources in the cloud environment, focused on the features of the service model "Infrastructure as a Service". Results: An approach has been developed for carrying out the decomposition of a cloud computing environment with the IAAS service model. The analysis of existing methods of static allocation of resources has been carried out. The application of the method of analysis of hierarchies for this problem is substantiated. A step-by-step algorithm for finding the most acceptable alternative from the set proposed has been developed. An example of the application of the developed method for initializing a virtual host in a cloud environment with the IAAS service model is given. Conclusion. The proposed method makes it possible to rationally use the computing resources of the cloud environment, which uses the "Infrastructure as a Service" service model. Direction for further research. The development of this direction is the development of a method for dynamic redistribution of resources in a cloud environment with the IAAS service model.

Keywords: cold technologies; cold resources; hierarchical analysis method; static distribution of resources.

Introduction

Cloud computing is getting more popular this year. Khmarni calculation - the value of the data of the calculation of the resource through the Internet. With any obov'yazkovi such characteristics [1]:

self-service for demand, self-sustaining and changing the calculation of consumption, such as the server hour, accessibility and data collection, data collection, which are taken care of, without interfering with the representative of the postal worker;

universal access to the network, services available to helpers as soon as data is transferred independently from the terminal building, which is victorious;

pooling resources, post-employee pooling service resources for a large number of supporters in a single pool for dynamic redistribution of capacities between supporters for the minds of a fast change to drink fatigue; with this support, control over the main parameters of the service (for example, obligatory data, security of access); the actual distribution of resources, which are expected to be slow, the post-employee (in some situations, the slow can still be changed with certain physical parameters, for example, to show the data processing center due to the geographic proximity);

elasticity, services can be expanded without additional costs;

consumption accounting, the service provider automatically calculates consumed resources at a certain level of abstraction (for example, the amount of data stored, bandwidth, number of users, number of transactions); on the basis of these data, he evaluates the volume of services provided to consumers.

Meeting these requirements significantly affects the allocation of resources in the cloud infrastructure. In the scientific literature, there are a lot of methods for distributing resources in informational and numerical structures.

In the article [2] the author proposes the random swap clustering algorithm. However, wines are essentially efficient in case of congestion for gloomy infrastructures. When carrying out the optimal distribution of throughput rates for self-healing (eng. self-healing) segment of computer storage in [3], the specifics of cold storage systems are not considered.

The methods proposed by [4] are focused only on mobile components. In [5], the larger world is insured by the features of roaming objects, and not by the characteristics of cloud computing.

In the article [6] one can see the methods and distribution of resources, which put clocks on another plan, showing an emphasis on non-penetrating meals.

The articles [7, 8] are directed only to the specifics of Big Data.

Article [9] is focused only on systems that process video images. And in [10], the emphasis is only on specific applications.

However, look at the approaches and methods of allocation of resources are not taken into account the particularities of gloomy calculation. It can lead to an inefficient botched infrastructure, especially the IAAS service model.

To this end, this article provides a description of the method of static allocation of resources in the cloud environment, focused on the features of the service model "Infrastructure as a Service".

1. Decomposition of the cloud computing environment

Developing a method for allocating resources in a cloud computing environment focused on the service "Infrastructure as a Service" (IaaS) is a multi-stage task. It consists of two main tasks: initial allocation of resources; dynamic reallocation of resources.

In this article, we will consider the approach to solving the first task.

Given the heterogeneity of the cloud environment, it is proposed to solve this task in 2 stages:

stage 1: decomposition of the cloud computing environment into zones, based on the defining features of the resources provided in each zone;

stage 2: initial static provisioning for all hosts running in the cloud environment.

At the first stage, the cloud computing environment is decomposed into zones, based on the defining features of the resources provided in each zone. Each of the zones includes servers and storage resources with similar characteristics.

Consider the mathematical model of the process of decomposition of the cloud environment S into n zones using the IaaS service model:

$$S = \bigcup_{i=1}^n S_i, \quad \bigcap_{i=1}^n S_i = \emptyset, \quad (1)$$

where S_i is the i -th zone, which includes resources with similar characteristics, i.e.

$$S_i = \left(\bigcup_{j=1}^{n_{ih}} h_{ij} \right) \cup \left(\bigcup_{\ell=1}^{n_{id}} d_{i\ell} \right), \quad (2)$$

where n_{ih}, n_{id} – are the number of servers and the number of data storages in the i -th zone of the cloud environment with the IaaS service model, respectively; $h_{ij}, j = \overline{1, n_{ih}}$, $d_{i\ell}, \ell = \overline{1, n_{id}}$ – are servers and data storages located in the i -th zone of the cloud environment with the IaaS service model, respectively.

Each server and each data warehouse will be characterized by the numerical characteristic-specification that is the most significant $|h_{ij}|, |d_{i\ell}|$ for this task, respectively. Then, to implement the process of decomposition of the cloud environment in accordance with expression (1), we can introduce two numerical decreasing, non-uniform in the general case, ordinal scales (Fig. 1):

$$K_h = (K_{h0}, \dots, K_{hi}, \dots, K_{hn}), \quad (3)$$

$$K_{h0} \geq K_{h1} \geq \dots \geq K_{hi} \geq \dots \geq K_{hn};$$

$$K_d = (K_{d0}, \dots, K_{di}, \dots, K_{dn}), \quad (4)$$

$$K_{d0} \geq K_{d1} \geq \dots \geq K_{di} \geq \dots \geq K_{dn}.$$

The constructed scales (3) and (4) allow us to write down the necessary and sufficient conditions for the formation of n non-overlapping zones during the decomposition of a cloud environment with an IaaS service model. To do this, consider a randomly selected server h with a numerical characteristic-specification $|h|$ and a data warehouse d with a numerical characteristic-specification $|d|$. Then:

$$(h \in S_i \Leftrightarrow h_{i-1} \leq |h| < h_i) \& (|h| = h_n \Rightarrow h \in S_n); \quad (5)$$

$$(d \in S_i \Leftrightarrow d_{i-1} \leq |d| < d_i) \& (|d| = d_n \Rightarrow d \in S_n). \quad (6)$$

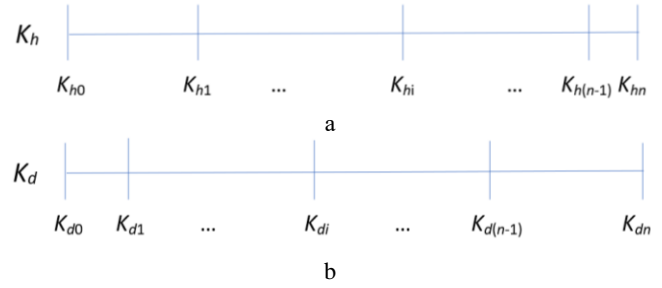


Fig. 1. Type of scales for servers (a) and data storages (b)

Expressions (5) and (6) determine the conditions for performing decomposition (1) and are based on scales (3) and (4). In turn, these scales are formed by the administrator of the cloud computing environment, based on his expert knowledge about the features of the equipment and its compatibility. Also, the history of operation of this cloud environment with the IaaS service model can be taken into account.

For example, consider the process of decomposing a cloud computing environment into 3 zones. The characteristic-specification for servers determines the number of CPUs, and for disk storages - the type of disk array class (DA, determines potential uses). Let the cloud environment under study be based on the following computing facilities:

- 2 dual processor servers;
- 2 four-processor servers;
- 3 eight-processor servers;
- 1 sixteen-processor server;
- 2 twenty-four processor servers;
- 2 DA HP XP12000 (Hi-End class);
- 1 DA Hitachi USP-V (Hi-End class);
- 2 DA IBM DS-4700 (Mid-Range class);
- 3 DA SDS DS-207 (Entry-level class).

Based on a preliminary analysis of user requests, it is planned to build zones of high (High load zone, HZ), medium (Medium load zone, MZ) and low (Low load zone, LZ) load. Based on this, at startup, the virtual host will be placed in the zone whose resources it will most likely need, based on the initial characteristics (number of CPUs, amount of RAM, amount of storage). For decomposition, two scales are formed: numerical scale $K_h = (24, 8, 4, 2)$; quality scale $K_d = (\text{Hi-End; Mid-Range, Entry-level, 0})$.

The result of the decomposition is clearly shown in Fig. 2.

2. Choosing a method for initial allocation of computing resources

When choosing a static resource allocation method, you should be guided by the characteristic features of the IaaS service model. The analysis of existing resource allocation methods for multicriteria decision-making problems, carried out in [11], showed the possibility of using the mathematical apparatus of the hierarchy analysis method [12].

The main application of the method is decision support through the hierarchical composition of the problem and the rating of alternative solutions. Let us describe the capabilities of this method [12].

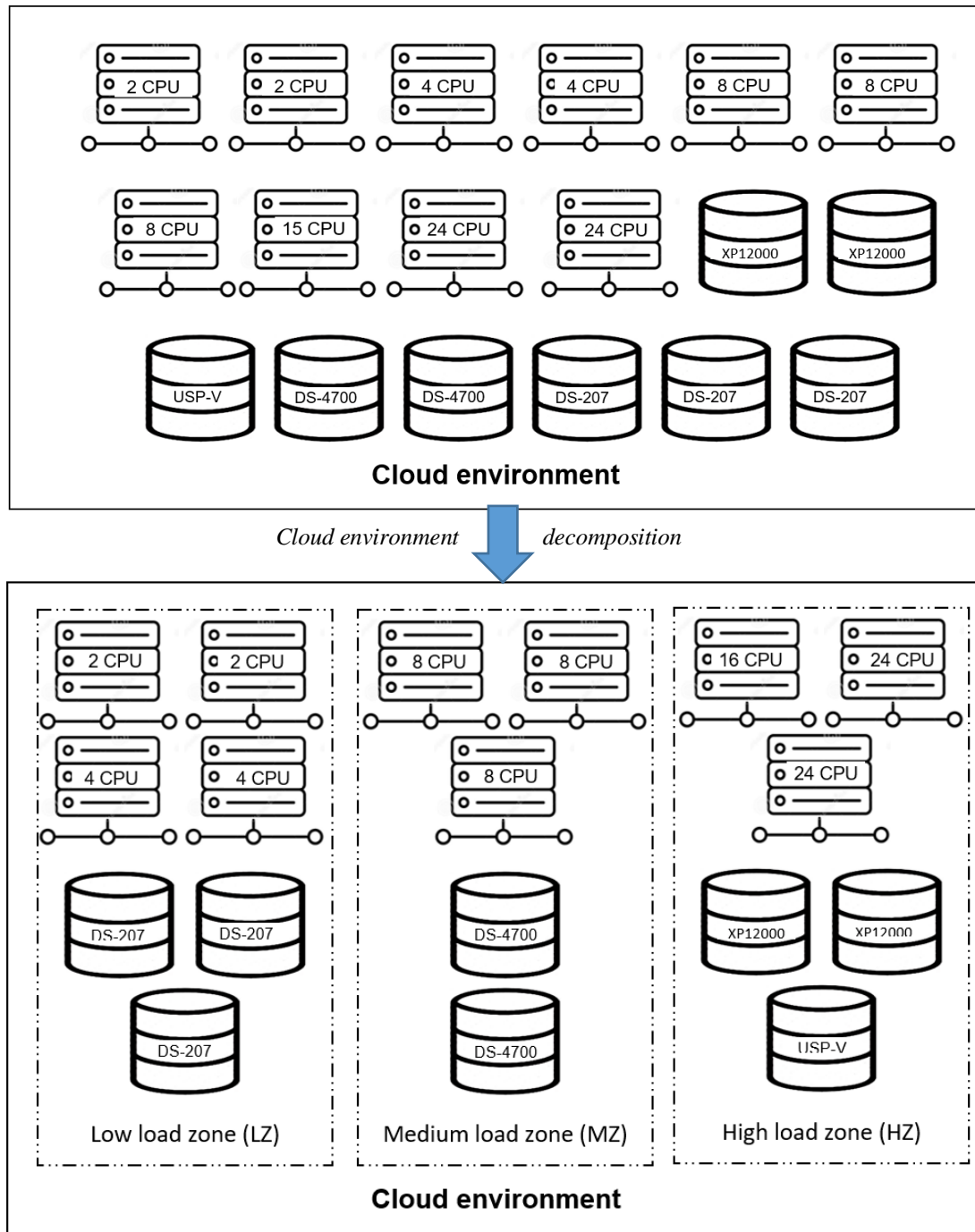


Fig. 2. An example of decomposing a cloud environment into 3 zones

- The method allows to analyze the problem; at the same time, the decision-making problem is presented in the following form of hierarchically ordered components:

- the main goal (main criterion) of rating possible solutions,
- several groups (levels) of the same type of factors, one way or another affecting the rating,
- groups of possible solutions,
- systems of links indicating the mutual influence of factors and decisions.

- The method allows you to collect data on the problem. In accordance with the results of hierarchical decomposition, the decision-making situation model

has a cluster structure. The set of possible solutions and all factors influencing decision priorities are divided into relatively small groups - clusters. The procedure of paired comparisons developed in the hierarchy analysis method makes it possible to determine the priorities of the objects included in each cluster. For this, the eigenvector method is used. So, the complex problem of data collection is broken down into a number of simpler ones that can be solved for clusters.

- The method allows us to evaluate data inconsistency and minimize it. For this purpose, matching procedures have been developed in the hierarchy analysis method. In particular, it is possible to identify the most conflicting data, which allows you to

identify the least clear areas of the problem and organize more careful selective thinking about the problem.

- The method allows to carry out the synthesis of the problem of decision making. After the analysis of the problem has been carried out and data has been collected for all clusters, the final rating is calculated using a special algorithm - a set of priorities for alternative solutions.

The properties of this rating allow for decision support. For example, the decision with the highest priority is made. In addition, the method allows you to build ratings for groups of factors, which allows you to evaluate the importance of each factor.

- The method allows you to organize a discussion of the problem, contributes to the achievement of consensus. The opinions that arise when discussing a decision problem can themselves be considered as possible solutions in a given situation. Therefore, the method of analyzing hierarchies can be applied to determine the importance of taking into account the opinion of each participant in the discussion.

- The method allows assessing the importance of taking into account each decision and the importance of taking into account each factor that affects the priorities of decisions. In accordance with the formulation of the decision-making problem, the priority value is directly related to the optimality of the solution. Therefore, decisions with low priorities are rejected as irrelevant. As noted above, the method allows to evaluate the priorities of the factors.

Therefore, if at the exclusion of a certain factor the priorities of solutions change insignificantly, such a factor can be considered insignificant for the problem under consideration.

- The method allows assessing the stability of the decision being made. The decision being made can be considered justified only if the inaccuracy of the data or the inaccuracy of the structure of the model of the decision-making situation do not significantly affect the rating of alternative decisions.

The advantages of this method in solving the problem of initial allocation of resources in cloud computing environments in comparison with other methods of multicriteria analysis should include [12]:

Lack of general rules for the formation of the structure of the decision-making model, which allows to take into account the "human factor" in the preparation of decision-making. Thus, it is possible to bring the work of the resource allocation subsystem closer to the actions of a system administrator, who is able to take into account the implicit relationships between various parameters of the functioning of a cloud computing environment.

- Simplicity of the rating calculation procedure, which makes it possible to make the decision selection process as transparent as possible when setting up the resource allocation subsystem.

- The method provides an opportunity to take into account the opinion of not one, but several experts, which makes it possible to obtain a more objective assessment of the significance of indicators.

- The method provides rich opportunities for identifying and minimizing contradictions in the source data, which allows you to effectively operate with a large number of indicators in the decision-making process.

- The method not only provides a way to identify the most preferred solution, but also quantifies the degree of preference through ratings, reflecting the natural course of human thinking and giving a more general approach than the method of logical chains. This allows us to use the results more fully when we use them later (for example, if starting a virtual host on a server that is the best alternative fails).

However, the hierarchy analysis method also has a number of disadvantages, which are listed below.

- Within the Hierarchy Analysis Method, there is no means to validate the data. This is an important drawback, which partly limits the possibilities of applying the method.

However, when choosing the optimal Hardware for hosting a virtual host in a cloud environment, in principle, there can be no objective data due to their poor formalizability and implicit dependencies. At the same time, the procedure of paired comparisons for data collection has practically no worthy alternatives. If the data collection was carried out with the help of experienced experts, and there are no significant inconsistencies in the data, then the quality of such data is considered satisfactory.

- The method only provides a way to rate the alternatives, but has no internal means for interpreting the ratings, ie. It is believed that the person making the decision, knowing the rating of possible solutions, must, depending on the situation, draw a conclusion himself. However, the data obtained is sufficient to make a decision within the resource allocation subsystem in a cloud environment with an IaaS service model.

Thus, the above shortcomings of the hierarchy method in the initial allocation of resources for the problem under consideration are not essential.

Thus, the expediency of using the hierarchy analysis method for solving the problem of initial resource allocation in a cloud environment with the IaaS service model is substantiated.

3. Methods of resource allocation in cloud infrastructures

The initial or base allocation of resources for each running virtual host in a cloud environment with an IaaS service model is performed using a hierarchy analysis method.

As is known, the Saaty hierarchy analysis method is successfully used in various fields of science and technology to solve similar problems [11], however, due to the peculiarities of the problem being solved, it requires a number of steps that take into account the specifics of cloud computing environments with the IaaS service model [53] (Fig. 3).

At the first step, the computing cloud environment is decomposed into zones in accordance with the approach described above. Hardware characteristics in each of the zones are close to each other.

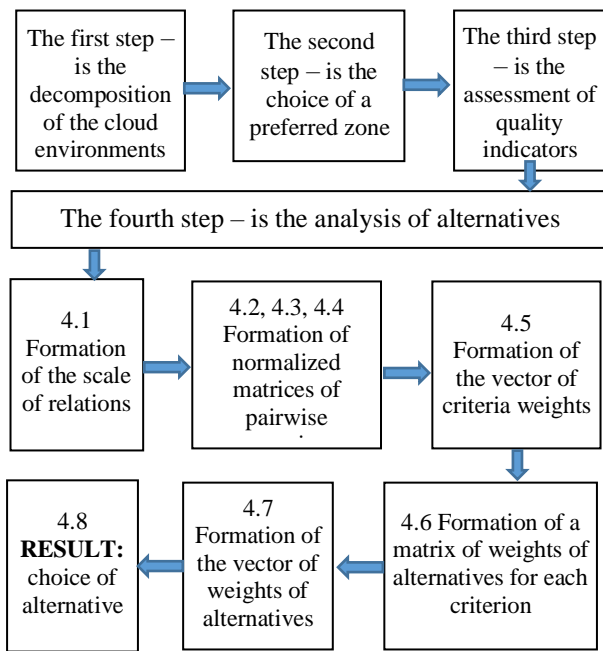


Fig. 3. Scheme of application of the method of Saaty hierarchies' analysis

At the second step, taking into account the restrictions set for the virtual host (on the number of processors, memory size, storage resources, etc.), the most preferable zone is selected for it. The use of zones allows you to take into account the limitations of the launched instance in terms of characteristics in order to choose its location already where there will be enough resources for the operation of applications running on the virtual host. In the selected zone, the set of all possible alternatives for the Hardware that ensures the functioning of the required virtual host is defined:

$$A = \{A_1, \dots, A_m\}, \quad \text{card } A = m. \quad (7)$$

The third step evaluates the quality indicators that describe the functioning of each Hardware component included in the selected zone. At this step, for each host from the zone defined in the previous step, the values of quality indicators [11] are evaluated, which describe the functioning of the Hardware.

The complex quality indicator is determined by the set of considered quality indicators. This set consists of three subsets, which are groups of key quality indicators for a cloud environment with an IaaS service model:

$$MP = \{P, R, S, C\},$$

where P – is a subset of particular performance indicators; R – is a subset of particular reliability indicators; S – is a subset of particular load indicators; C – is a subset of cost indicators.

Accordingly, the subset data consists of the following partial quality indicators:

$$P = \{p_1, \dots, p_{n1}\}; \quad (8)$$

$$R = \{p_{n1+1}, \dots, p_{n2}\}; \quad (9)$$

$$S = \{p_{n2+1}, \dots, p_{n3}\}; \quad (10)$$

$$C = \{p_{n3+1}, \dots, p_n\}. \quad (11)$$

where n – is the total number of partial indicators, among which $n1$ – is the number of performance indicators, $(n2 - n1)$ – is the number of reliability indicators, $(n3 - n2)$ – is the number of load indicators, $(n - n3)$ – is the number of cost indicators

At the same time, the set of particular quality indicators that affect the complex quality indicator can be summarized in 2 groups: deterministic (associated with equipment configuration) and stochastic (associated with load and operating time). Some of these indicators, such as the physical condition of the equipment and the level of competence of the maintenance personnel, cannot be quantified, and therefore are fuzzy and can be represented as linguistic variables [12].

At the fourth step, to select the most preferred Hardware for hosting a virtual host, an analysis of alternatives is performed based on the obtained values of quality indicators [11]. Each indicator has its own predetermined weight, determined by an expert for each zone based on the generalized needs of customers and available equipment. As a result, the Hardware composition is selected to host the virtual host, providing the maximum probability of optimal resource allocation P_{max} .

Table 1 – Scale of relations (degrees of significance of the parameters of the functioning of the cloud computing environment)

Z*	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two parameters contribute equally to the achievement of the goal
3	Some predominance of the significance of one action over another (weak significance)	There are considerations in favor of preferring one of the parameters, but these considerations are not convincing enough
5	Substantial or strong significance	There are reliable data or logical judgments to show preference for one of the options
7	Obvious or very strong significance	Strong evidence in favor of one parameter over another
9	Absolute significance	The evidence for favoring one parameter over the other is overwhelmingly compelling.
2,4,6,8	Intermediate values between two neighboring judgments	A situation where a compromise solution is needed

* Z - degree of significance

Consider step by step the algorithm for performing the analysis of alternatives based on the obtained values of quality indicators.

Step 4.1. A qualitative scale is preliminarily determined for pairwise comparison with subsequent conversion to scores in accordance with Table 1. Pairwise comparisons are carried out in terms of the dominance of one element over another.

If the parameter i is assigned one of the non-zero numbers defined above when compared with the parameter j , then the opposite value is assigned to the parameter j when compared with the parameter i .

Step 4.2. We form a square matrix of pairwise comparisons of all indicators with the size $n \times n$:

$$M_{crit} = (\xi_{j\ell}), \quad j, \ell = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Step 4.3. For each indicator, we form a square matrix of pairwise comparisons of all possible alternatives, i.e. get an array of matrices

$$M_{pi} = (\eta_{ij\ell}), \quad i = \overline{1, n}; \quad j, \ell = \overline{1, m}. \quad (13)$$

Step 4.4. We normalize matrices (12), (13) according to the following scheme:

$$M_{crit}^{(norm)} = \left(\xi_{j\ell} / \sum_{\zeta=1}^n \xi_{\zeta\ell} \right), \quad j, \ell = \overline{1, n}; \quad (14)$$

$$M_{pi}^{(norm)} = \left(\eta_{ij\ell} / \sum_{\zeta=1}^m \eta_{i\zeta\ell} \right), \quad (15)$$

$$i = \overline{1, n}; \quad j, \ell = \overline{1, m}.$$

Step 4.5. From the normalized matrix (14) we form a weight column-vector of criteria of size $(1 \times n)$, finding the average value for each row of this matrix:

$$V_{crit}^{(weight)} = (v_j) = \left(\sum_{\ell=1}^n \left(\xi_{j\ell} / \sum_{\zeta=1}^n \xi_{\zeta\ell} \right) / n \right), \quad (16)$$

$$j = \overline{1, n}.$$

Step 4.6. From normalized matrices (15), we form a matrix of weights of alternatives for each criterion (consisting of weight columns obtained in a similar way) with the size $(m \times n)$:

$$M_p^{(weight)} = (m_{ij}) = \left(\sum_{\ell=1}^m \left(\eta_{ij\ell} / \sum_{\zeta=1}^m \eta_{i\zeta\ell} \right) / m \right), \quad (17)$$

$$i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}.$$

Step 4.7. Multiplying the resulting matrix (17) by column (16) according to the rule of matrix multiplication, we obtain a normalized (by construction) vector of weights of alternatives of size $(1 \times m)$ in terms of achieving the goal:

$$W_A = M_p^{(weight)} \cdot V_{crit}^{(weight)} = (w_j), \quad (18)$$

$$j = \overline{1, m}; \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1.$$

Step 4.8. Then the most acceptable solution from the point of view of the hierarchy analysis method is the alternative corresponding to the maximum element of the vector (18), i.e.

$$A_{pr} = \left(A_i \mid w_i = \max_j (w_j), \quad j = \overline{1, m} \right). \quad (19)$$

4. Initial boot of the virtual host

Let's consider the launch of a virtual host in a cloud environment with an IaaS service model using a specific example.

As an example, consider the cloud computing environment discussed above, the decomposition result of which (step 1) is shown in Fig. 2. The main parameters of the functioning of the computing environment (expressions (8) - (11)) are described by such values:

$$P = \{N_{CPU}, N_{Nucl}, V_{CPU}, V_{net}\}; \quad (20)$$

$$R = \{\Delta T_{fail}, Cond_{hw}, Serv_{pers}, VM\}; \quad (21)$$

$$S = \{V_{RAM}, Z_{CPU}, Z_{net}, EM, N_{vh}\}; \quad (22)$$

$$C = \{c_{rent}\}. \quad (23)$$

where N_{CPU} is the number of CPU;

N_{Nucl} – number of cores in each CPU;

V_{CPU} – clock frequency of the CPU;

V_{net} – network speed;

ΔT_{fail} – mean time between failures;

$Cond_{hw}$ – the degree of the physical state of the Hardware;

$Serv_{pers}$ – the level of competence of personnel for equipment maintenance;

VM – average speed of access to external memory;

EM – the amount of available external memory;

V_{RAM} – free area of RAM;

Z_{CPU} – CPU load,

Z_{net} – network load,

N_{vh} – number of running instances of virtual hosts;

c_{rent} – relative cost of monthly rent

To perform step 2, we determine the minimum hardware requirements to ensure the functioning of the virtual host:

$$N_{CPU} \geq 12; \quad N_{Nucl} \geq 12;$$

$$V_{CPU} \geq 2 \text{ GHz}; \quad V_{net} \geq 1000 \text{ Mbps};$$

$$\Delta T_{fail} \geq 1000 \text{ hour}; \quad (24)$$

$$Cond_{hw} \geq 0.95;$$

$$Serv_{pers} = 1.$$

As can be seen from the conditions (24), for this virtual host, it is necessary to select a high performance zone (High load zone, HZ, Fig. 2).

To perform the third step, let's determine the current values of indicators for Hardware from the HZ zone (Table 2, 3).

Table 2 – Server specifications

Hardware	Performance				Reliability			Loading			
	N_{CPU}	N_{Nucl}	V_{CPU}	V_{net}	ΔT_{fail}	$Cond_{hw}$	$Serv_{pers}$	V_{RAM}	Z_{CPU}	Z_{net}	N_{vh}
Server 1	16	12	2 GHz	10^3 Mbps	10^4 h	0,96	1	50 %	60 %	30 %	5
Server 2	24	16	4 GHz	$5 \cdot 10^3$ Mbps	10^4 h	0,96	1	70 %	20 %	30 %	2
Server 3	24	20	8 GHz	$8 \cdot 10^3$ Mbps	10^5 h	0,99	1	60 %	40 %	50 %	3

Table 3 – Disk array specifications

Дисковый массив	VM	EM
XP12000 - 1	7 Gb/s	40 %
XP12000 - 2	11 Gb/s	60 %
USP-V	25 Gb/s	90 %

Conditions (24) are satisfied by any Hardware options, so at the output of step 3, 9 alternative options will be formed (Table 4).

The unit of relative rental cost is the cost of the cheapest alternative.

Now it is possible to proceed to the analysis of alternatives (step 4). The qualitative scale for pairwise comparison with subsequent conversion into points is determined in accordance with Table. 1.

Matrices of pairwise comparisons are formed for all indicators and all possible alternatives.

After all the transformations in accordance with (14) - (18), we obtain the vector of weights of alternatives (Table 5).

Table 4 – List of alternatives

№	Hardware	C_{rent}
1.	Server 1, XP12000 - 1	1
2.	Server 1, XP12000 - 2	1.1
3.	Server 1, USP-V	1.5
4.	Server 2, XP12000 - 1	1.2
5.	Server 2, XP12000 - 2	1.3
6.	Server 2, USP-V	1.6
7.	Server 3, XP12000 - 1	1.7
8.	Server 3, XP12000 - 2	1.8
9.	Server 3, USP-V	2.4

Analysis of the results (Table 5) shows that the most acceptable at the moment for the initial loading of a virtual host with requirements (23) is alternative 5: Server 2, XP12000 - 2, the rent is 30% more than the minimum possible for these requirements.

Таблиця 5 – Vector of weights of alternatives

№	1	2	3	4	5
The weight	0.09	0.11	0.07	0.18	0.21

№	6	7	8	9
The weight	0.17	0.08	0.14	0.05

Analysis of the results (Table 5) shows that the most acceptable at the moment for the initial loading of a virtual host with requirements (23) is alternative 5: Server 2, XP12000 - 2, the rent is 30% more than the minimum possible for these requirements.

Conclusions

The article proposes a method that allows allocating the required computing resources for the initial launch of a virtual host. The method is focused on the functioning of a virtual host in a cloud environment focused on the service model "Infrastructure as a Service".

An approach has been developed for carrying out the decomposition of a cloud computing environment with the IAAS service model.

The analysis of existing methods of static allocation of resources has been carried out. The application of the method of analysis of hierarchies for this problem is substantiated. A step-by-step algorithm for finding the most acceptable alternative from the set proposed has been developed.

An example of the application of the developed method for initializing a virtual host in a cloud environment with the IAAS service model is given.

The proposed method makes it possible to rationally use the computing resources of the cloud environment, which uses the "Infrastructure as a Service" service model. Direction for further research. The development of this direction is the development of a method for dynamic redistribution of resources in a cloud environment with the IAAS service model.

REFERENCES

- Zhen, Xiao, Weija, Song, and Qu, Chen (2018), "Dynamic Resource Allocation using Virtual Machines for Cloud Computing Environment", *IEEE transaction on parallel and distributed systems*, Vol. 24, Is. 6, pp. 1107 – 1117, June 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/TPDS.2012.283.v>.
- Franti, P. (2018), "Efficiency of random swap clustering", *Journal of Big Data*, vol. 5, No. 13, pp. 1-29. doi: <https://doi.org/10.1186/s40537-018-0122-y>.

3. Kuchuk, N., Shefer, O., Cherneva, G. and Alnaeri, F.A. (2021), “Determining the capacity of the self-healing network segment”, *Advanced Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 114–119, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>.
4. Qiang, Ye. and Zhuang, W. (2017), “Distributed and adaptive medium access control for internet-of-things-enabled mobile networks”, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 446–460, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2566659>.
5. Khudov, H., Tahyan, K., Chepurnyi, V., Khizhnyak, I., Romanenko, K., Nevodnichii, A. and Yakovenko, O. (2020), “Optimization of joint search and detection of objects in technical surveillance systems”, *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 156–162, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.23>.
6. Semenov, S. and Cao, Weilin, (2020), “Testing process for penetration into computer systems mathematical model modification”, *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 133–138, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.19>.
7. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I.E., Svyrydov, A. and Kharchenko, V. (2019), “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, pp. 161–183, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8.
8. Nechausov, A., Mamusuc, I. and Kuchuk, N. (2017), “Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures”, *Advanced Information Systems*, vol. 1, no. 2, , pp. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.
9. Kuchuk, H., Kovalenko, A., Ibrahim, B.F. and Ruban, I. (2019), “Adaptive compression method for video information”, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(1), pp. 66–69, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.30534/ijatcse/2019/1181.22019>.
10. Bulba, S. (2018), “Composite application distribution methods”, *Advanced Information Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 128–131, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.22>.
11. Petrovska, I. and Kuchuk H. (2022), “Features of the distribution of computing resources in cloud systems”, *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 2, pp. 75–78, doi: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.075>.
12. Saaty T. L. (2008). “Decision making with the analytic hierarchy process”, *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, pp. 83–98, doi: <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.

Received (Надійшла) 16.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.06.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Петровська Інна Юрївна – аспірантка, кафедра комп’ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Inna Petrovska – PhD Student of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: innap6699@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1425-3426>.

Кучук Георгій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп’ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Heorhii Kuchuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kuchuk56@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2862-438X>.

Метод статичного виділення ресурсів у хмарному середовищі з моделлю обслуговування IAAS

І. Ю. Петровська, Г. А. Кучук

Анотація. У статті розглянуто метод, що дозволяє виділити необхідні обчислювальні ресурси початкового запуску віртуального хоста. Метод орієнтований на функціонування віртуального хоста у середовищі хмар, орієнтованої на модель обслуговування «Інфраструктура як сервіс». Предмет дослідження – методи статичного розподілу ресурсів у хмарних середовищах. Об’єкт дослідження – процес функціонування віртуального хоста у середовищі, що забезпечує йому всі інформаційно-технологічні ресурси. Мета дослідження – розробити метод статичного виділення ресурсів хмарного середовища, орієнтований на особливості моделі обслуговування «Інфраструктура як сервіс». Отримані результати. Розроблено підхід щодо декомпозиції хмарного обчислювального середовища з моделлю обслуговування IAAS. Проведено аналіз існуючих методів статичного виділення ресурсів. Обґрунтовано застосування для цього завдання методу аналізу ієрархій. Розроблено покроковий алгоритм пошуку найбільш прийнятної альтернативи з безлічі запропонованих. Наведено приклад застосування розробленого методу ініціалізації віртуального хоста в хмарному середовищі з моделлю обслуговування IAAS. Висновок. Запропонований метод дозволяє раціонально використовувати обчислювальні ресурси хмарного середовища, яке використовує модель обслуговування «Інфраструктура як сервіс». Напрямок подальших досліджень. Розвиток цього напрямку – розробка методу динамічного перерозподілу ресурсів у хмарному середовищі з моделлю обслуговування IAAS.

Ключові слова: хмарні технології, хмарні ресурси, метод аналізу ієрархій, статичний розподіл ресурсів.