



Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"



Сучасні Інформаційні системи

Advanced Information Systems

Sučasnì ìnformacìjnì sistemi

Том 6, № 2

Volume 6, No. 2

**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 (057) 707-61-65

Phone: +38 (057) 707-61-65

E-mail редколегії:

Heorhii.Kuchuk@khpі.edu.ua

E-mail of the editorial board:

Heorhii.Kuchuk@khpі.edu.ua

Інформаційний сайт:

<http://ais.khpі.edu.ua>

Information site:

<http://ais.khpі.edu.ua>

*Затверджений до друку Вченою Радою Національного технічного університету
"Харківський політехнічний інститут" (протокол від 27 травня 2022 року № 4).*

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*);
КОСТЕНКО Павло Юрійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КУЧУК Георгій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ЛИТВИН Василь Володимирович
(*д-р техн. наук, проф., Львів, Україна*);
ЛУКІН Володимир Васильович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
МАМУЗІЧ Ілля
(*д-р техн. наук, проф., Загреб, Хорватія*);
МИГУЩЕНКО Руслан Павлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
МОХАММЕД Амін Саліх
(*д-р наук, доц., Ербиль, 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., Ербиль, 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:

ПОДОРОЖНЯК 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*);
Pavlo KOSTENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Heorhii KUCHUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Vasyl LYTUVYN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Lviv, Ukraine*);
Volodymyr LUKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Ilya MAMUZICH
(*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

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Левченко Л. О., Глива В. А., Бурдейна Н. Б. Математичний апарат моделювання поширення магнітного поля електричних машин із заданою точністю (eng.)	5
Резанов Б. М., Кучук Г. А. Моделювання процесу двофакторної автентифікації (eng.)	10
Хорошун Г. М., Рязанцев О. І., Коверга М. О., Покришка С. А. Моделі машинного навчання для передбачення кількості захворюлих на COVID-19 в Україні та Індії	16
Худавердієва М. А. Моделювання мобільного робота з вибігом перешкод з використанням нечіткого контролера (eng.)	21

МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

Александров Є. Є., Александрова Т. Є., Костяник І. В., Моргун Я. Ю. Про стійкість руху, що стабілізується, ракети-носія з рідинним реактивним двигуном і бортовою цифровою обчислювальною машиною в контурі стабілізації (eng.)	26
--	----

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Бекірова Л., Мамедова Е., Бунятова Е. Розробка методики розрахунку основних показників островів тепла в місці (eng.)	33
---	----

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Триснюк В. М., Триснюк Т. В., Курило А. В., Голован Ю. М., Пащенко Є. Ю. Системний аналіз інформаційно-аналітичного забезпечення органів адміністративного управління	37
---	----

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

Чалий С. Ф., Лещинський В. О. Темпоральне представлення сутностей предметної області для побудови пояснень в інтелектуальних системах (eng.)	42
--	----

TABLE OF CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS MODELING

Larysa Levchenko, Valentyn Glyva, Nataliia Burdeina Mathematical apparatus for modelling of the propagation the magnetic field electric machines with a given accuracy	5
Bohdan Rezanov, Heorhii Kuchuk Modelling the process of two-factor authentication	10
Ganna Khoroshun, Oleksandr Ryazantsev, Mark Koverha, Sergey Pokryshka Machine learning models for predicting the number of COVID-19 patients in Ukraine and India (ukr)	16
Mahabbat Khudaverdiyeva Modeling of mobile robot with obstacle avoidance using fuzzy controller	21

ADAPTIVE CONTROL METHODS

Eugene Aleksandrov, Tetiana Aleksandrova, Iryna Kostianyk, Yaroslav Morgun 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	26
---	----

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

Lala Bekirova, Esmira Mammadova, Elvira Bunyatova Development of the methods for calculating the main indicators of heat islands in urban areas	33
--	----

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

Vasyl Trysnyuk, Taras Trysnyuk, Anatolii Kurilo, Yurii Holovan, Yevhen Pashchenko System analysis of information and analytical support of administrative management (ukr)	37
--	----

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi Temporal representation of the essences of the subject area for the construction of explanations in intelligent systems	42
---	----

МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Паши́нських В. В., Мелешко Є. В.,
Яки́менко М. С., Бащенко Д. В.,
Ткачук Р. О.*

Дослідження можливостей мови програмування C#
для створення програмного забезпечення аналізу
кібербезпеки в комп'ютерних мережах та
комп'ютерно-інтегрованих системах (eng.) 48

*Погасій С. С., Мілевський С. В.,
Томашевський Б. П., Воронай Н. І.*

Розробка концепції двоконтурного захисту
соціокіберфізичних систем (eng.) 57

ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Зуєв А. О., Івашко А. В., Лунін Д. О.

Методи компенсації самонагріву
мікроболометричних матриць
при обробці тепловізійних зображень (eng.) 67

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

Метод контролю частоти власних коливань
для визначення ваги тіла космонавта
і малої ваги в умовах невагомості 74

Смірнова Т. В.

Метод забезпечення надійності підключення вузлів
до інформаційно-комунікаційної системи
підприємства на базі 5G 82

Алфавітний покажчик 88

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION

*Vladyslav Pashynskykh, Yelyzaveta Meleshko,
Mykola Yakymenko, Dmytro Bashchenko,
Roman Tkachuk*

Research of the possibilities of the C# programming
language for creating cybersecurity analysis
software in computer networks and
computer-integrated systems 48

*Serhii Pohasii, Stanislav Milevskyi,
Bohdan Tomashevsky, Natalya Voropay*

Development of the double-contour protection
concept in socio-cyberphysical systems 57

APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION

Andrey Zuev, Andrey Ivashko, Denis Lunin

Methods for compensating of microbolometer
matrices self-heating in the thermal
images processing 67

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

Method for controlling the frequency of eigentones
for determination of the astronaut's body weight
and small weight in weightlessness (ukr) 74

Tetiana Smirnova

Method of ensuring the reliability of connecting nodes
to the information and communication system
of the enterprise based on 5G (ukr) 82

Alphabetical index 88



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)	26	Мамедова Е. (Esmira Mammadova)	33
Александрова Т. Є. (Tetiana Aleksandrova)	26	Мелешко Є. В. (Yelyzaveta Meleshko)	48
Башченко Д. В. (Dmytro Bashchenko)	48	Мілевський С. В. (Stanislav Milevskyi)	57
Бекірова Л. (Lala Bekirova)	33	Моргун Я. Ю. (Yaroslav Morgun)	26
Бунятова Е. (Elvira Bunyatova)	33	Олійник Р. М. (Ruslan Oliinyk)	74
Бурдейна Н. Б. (Nataliia Burdeina)	5	Пашинських В. В. (Vladyslav Pashynskykh)	48
Воропай Н. І. (Natalya Voropay)	57	Пашченко Є. Ю. (Yevhen Pashchenko)	37
Глива В. А. (Valentyn Glyva)	5	Погасій С. С. (Serhii Pohasii)	57
Голован Ю. М. (Yurii Holovan)	37	Покришка С. А. (Sergey Pokryshka)	16
Дмитрієв О. М. (Oleh Dmitriiev)	74	Пустоваров В. В. (Volodymyr Pustovarov)	74
Зув А. О. (Andrey Zuev)	67	Резанов Б. М. (Bohdan Rezanov)	10
Івашко А. В. (Andrey Ivashko)	67	Рязанцев О. І. (Oleksandr Ryazantsev)	16
Коверга М. О. (Mark Koverha)	16	Смірнова Т. В. (Tetiana Smirnova)	82
Коломійцев О. В. (Oleksii Kolomiitsev)	74	Ткачук Р. О. (Roman Tkachuk)	48
Комаров В. О. (Volodymyr Komarov)	74	Томашевський Б. П. (Bohdan Tomashevsky)	57
Костяник І. В. (Iryna Kostianyk)	26	Триснюк В. М. (Vasyl Trysnyuk)	37
Курило А. В. (Anatolii Kurilo)	37	Триснюк Т. В. (Taras Trysnyuk)	37
Кучук Г. А. (Heorhii Kuchuk)	10	Хорощун Г. М. (Ganna Khoroshun)	16
Левченко Л. О. (Larysa Levchenko)	5	Худавердієва М. А. (Mahabbat Khudaverdiyeva)	21
Лещинський В. О. (Volodymyr Leshchynskyi)	42	Чалий С. Ф. (Serhii Chalyi)	42
Лунін Д. О. (Denis Lunin)	67	Якименко М. С. (Mykola Yakymenko)	48

Наукове видання

**Сучасні
інформаційні системи****Advanced
Information Systems**Науковий журнал
Том 6, № 2Відповідальний за випуск *О. Ю. Заковоротний*
Технічні редактори *Д. С. Гребенюк, А. П. Шиман*
Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

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

Підписано до друку 03.06.2022 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 11,0. Тираж 100 прим. Зам. 603-22

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

Information systems modeling

УДК 621.319

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.01>Larysa Levchenko¹, Valentyn Glyva², Nataliia Burdeina²¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine² Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL APPARATUS FOR MODELING OF THE PROPAGATION OF THE MAGNETIC FIELD OF ELECTRICAL MACHINES WITH A GIVEN ACCURACY

Abstract. The problem of modeling the propagation of local magnetic fields and spatially dispersed sources is large errors compared to field measurements. An important aspect of adequate modeling is the use of the correct mathematical apparatus. It is shown that in order to obtain reliable models of the propagation of magnetic fields around electrical machines (generators, electric motors of different power, geometric dimensions and poles), it is advisable to apply the Gauss equation for a scalar potential. The solution of the equation in polar coordinates makes it possible to take into account not only the fundamental, but also other harmonics of the magnetic field (dipole, quadrupole, octupole). This allows, depending on the number of spatial harmonics taken into account, to obtain a model with the required accuracy (error) for predicting the magnetic field strength at any point around the machine. It is considered in the paper that an electrical machine is an object of base radius R_0 . The presented approach makes it possible to unambiguously determine the location of zero field points at a distance from the source (for a quadrupole source and zero field lines, for an octupole source). The results of modeling and their verification by full-scale measurements for the most common four-pole machines (quadrupole source) are presented. The main task of modeling the propagation of the magnetic field of such sources is to ensure the required accuracy based on the goals of modeling. It is shown that the modeling accuracy and the presence of zero field points are due to different field levels near the electrical machine housing for different harmonics. The dipole harmonic at the cabinet is 20% of its own harmonic. But it falls more slowly with distance. This necessitates taking into account a different number of harmonics depending on the value of the ratio R_0/R , R is the distance to the point of determining the field strength from the source. Therefore, with the ratio $R_0/R=2/3$, the eighth harmonic is essential. At $R_0/R=1/5$, already the fourth spatial harmonic can be neglected. Such data allow you to choose a rational number of harmonics. This reduces the amount of calculations and simplifies the process of modeling the propagation of the magnetic field around the source.

Keywords: modeling, calculation apparatus; electric machine; spatial harmonic; dipole.

Introduction

Electric machines are widely used in industrial, household and educational premises. These are electric generators, electric motors for various purposes and power. Determining the spatial distributions of their magnetic fields makes it possible to assess the possible impact on people, energy losses, etc. At the stages of designing the placement equipment in rooms, designing ventilation and heat supply systems, designing educational laboratories, such an assessment is possible by modeling the distribution of fields. Obtaining reliable data requires the presence of correct mathematical functions. A feature of modeling the propagation of ultra-low magnetic fields (power frequencies, its harmonics and interharmonics) is the need to ensure the required accuracy of the final result. That is, in functions of creating software for the implementation of modeling, it is necessary to lay an allowable error. This error may vary depending on the tasks. For the purposes of environmental safety, it can be larger, given the distribution of fields in areas where people stay periodically. In industrial and educational premises with limited space, it is necessary to accurately determine the zones of safe stay of people. The required accuracy of modeling can be ensured by taking into account a sufficient number of spatial harmonics of the magnetic field. To date, from an applied point of view, this has not been worked out enough. In particular, different patterns of extinction of individual harmonics of the field are not

taken into account. Enough harmonics have not been determined to calculate the magnetic field depending on the relative size of the electrical machine (the ratio of the actual size of the machine to the distance of determining the magnetic field strength).

These issues require consideration and the provision of unambiguous recommendations for modeling the propagation of a magnetic field with sufficient accuracy.

Analysis of recent research and publications

Much attention is paid to modeling the propagation of magnetic fields in electrical equipment. This is mainly aimed at reducing energy losses and concerns the distribution of the magnetic field inside the electrical device [1]. Such modeling requires minimal errors and is performed using the Comsol package. For the purposes of ensuring the safety of people, such a high accuracy is not necessary even for critical infrastructure facilities [2]. Studies on taking into account the spatial harmonics of the magnetic field of electrical machines [3] have shown that this approach is promising. It is advisable to model the propagation of a magnetic field in polar coordinates, and consider the change in the field in separate directions or angles. In most cases, models of the most common dipole-type field sources are considered [4, 5]. But most electrical machines are sources of quadrupole and even octupole magnetic fields. This greatly complicates the process of modeling the propagation of such fields. Consideration of such sources was started in [6], but the

field configurations in it are sketchy, and some provisions require clarification and deepening. The study [7] shows that any source of a magnetic field can be considered as a combination of magnetic dipoles with different magnetic moments. The works [8, 9] used the synthesis of the magnetic field of technical objects based on spatial harmonics. They mainly refer to the fields inside the minimum sphere enclosing the object. But for the purposes of human safety and the electromagnetic compatibility of electrical and electronic equipment, it is required modeling the propagation of an external magnetic field at the required distances. In this case, it is necessary to take into account the relative sizes of the sources in order to determine the required number of spatial harmonics.

Problem statement. The purpose of the work is to provide a convenient mathematical tool for modeling the propagation of the magnetic field of electrical machines, taking into account the required number of spatial harmonics, which ensures the necessary modeling accuracy.

Presentation of the main material

The main source of errors in modeling the propagation of magnetic fields of electrical equipment is taking into account the field of only industrial frequency. In real conditions, there are always harmonic fields of the fundamental frequency in space (mainly the third and other multiples of three).

This is due to the non-linearity of the current-voltage characteristics of most equipment, including the electric drive. In electrical machines of any design, it is always possible to distinguish harmonics corresponding to different harmonics depending on the number of poles of the machine: two, four, eight.

This corresponds to dipole, quadrupole and octupole harmonics ($n=1, 2, 3$).

The most common and powerful are four-pole electric machines. These include, for example, all generators of power plants and a powerful electric drive.

An accurate determination of changes in the level of the magnetic field with distance is expedient using the Gauss equation for a scalar magnetic potential. In spherical coordinates R, θ, φ , the source magnetic field distribution function has the form:

$$U_M = R_0 \times \sum_{n=1}^{\infty} (R_0/R)^{n+1} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\varphi + b_{nm} \sin m\varphi) \times P_n^m \times \cos \varphi,$$

where R_0 – the radius of the sphere of the determination the potential, a_{nm}, b_{nm} – constant coefficients $P_n^m \cos \varphi$ – Legendre polynomial.

In doing so, $R \geq R_0$, the coordinates a, b are the amplitudes of the spherical harmonics of the magnetic field strength in the sphere R_0 .

The strength (induction) of the magnetic field is determined from the above equation based on the fundamental relationships:

$$\mathbf{H} = -\text{grad} U_M, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H};$$

$$H_r = \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \times (R_0/R)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \times \cos m\varphi + b_{nm} \times \sin m\varphi) \times P_n^m \times \cos \theta;$$

$$H_\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} (R_0/R)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{mn} \times \sin m\varphi + b_{mn} \times \cos m\varphi) \times P_n^m \times \cos \theta / \sin \varphi;$$

$$H_\theta = \sum_{n=1}^{\infty} (R_0/R)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \times \cos m\varphi + b_{nm} \times \sin m\varphi) \times \frac{1}{\sin \varphi} \left[\begin{array}{l} (n-m+1) \times P_{n+1}^m \cos \varphi - \\ -(n+1) \times P_n^m \times \cos^2 \theta \end{array} \right].$$

The above relations indicate that the magnetic field strength decreases with distance, and this decrease is proportional to the increase in the harmonic index n .

Thus, based on the tasks set, it is advisable to consider the first spherical harmonics, which correspond to the slightest decrease in the level of the magnetic field with distance.

These are the dipole harmonic ($n=1$) and the quadrupole harmonic ($n=2$).

The radial component of the magnetic field is determined from the above relations by a standard procedure using the Legendre polynomials in the usual form.

Для $n=1$:

$$H_r^{(n=1)} = 2 \times (R_0/R)^3 \times (a_{10} \cos \theta + a_{11} \cos \varphi \sin \theta + b_{11} \sin \varphi \sin \theta).$$

Для $n=2$:

$$H_r^{(n=2)} = \frac{3}{4\pi} (R_0/R)^4 \times \left(\frac{a_{20}}{2} (3 \cos^2 \theta - 1) + 3(a_{21} \cos \varphi + b_{21} \sin \varphi) \sin 2\theta + 12(a_{22} \cos 2\varphi + b_{22} \sin 2\varphi) \sin^2 \theta \right).$$

These radial harmonics decrease with distance from the field source in proportion to the third and fourth steps of the radius.

A four-pole electric machine, in this case a turbogenerator, is a source of a magnetic field a dipole-quadrupole type, that is, a source that has dipole and quadrupole spherical harmonics of the field. The magnetic field around such a source is characterized by the sum of harmonics $H_r^{(n=1)}$ and $H_r^{(n=2)}$.

In general:

$$H = (R_0/R)^3 \times a_{11} \times \cos \varphi \times \sin \varphi + (R_0/R)^4 \times a_{22} \cos 2\varphi \times \sin^2 \theta.$$

Thus, the dependence of the field strength on the distance for different angles of spherical coordinates will differ significantly. For example, for

$$\theta = \frac{\pi}{2} \left(\sin \theta = 1, \sin^2 \theta = 1 \right)$$

in the direction $\varphi=0$ dipole and quadrupole harmonics are added, and in the direction $\varphi=\pi$ – are subtracted.

The result obtained is important from the point of view of ensuring the electromagnetic safety of personnel located near power generators.

This is explained by the fact that at $\varphi=\pi$ there is a point where $H=0$, that is, within this angle, the total levels of the fields are insignificant.

Considering the change in the field strength by $\varphi=0$ and $\varphi=\pi$, assuming $R_0=1$, we obtain the relation:

$$H_1 = \frac{a_{22}}{R^4} + \frac{a_{11}}{R^3},$$

$$H_2 = \frac{a_{22}}{R^4} - \frac{a_{11}}{R^3}.$$

The result obtained indicates that, under the condition $\varphi=\pi$, as a result of different rates of decrease in the strength of the dipole and quadrupole components of the magnetic field with distance, there is a point where $H = 0$. Modeling of the spatial distribution the magnetic field a four-pole electric machine using the Matlab package for $\varphi=\pi$, $R=2$ is shown in Fig. 1, a.

An experimental verification of the change in the magnetic field of a four-pole electric machine with distance is shown in Fig. 1, b.

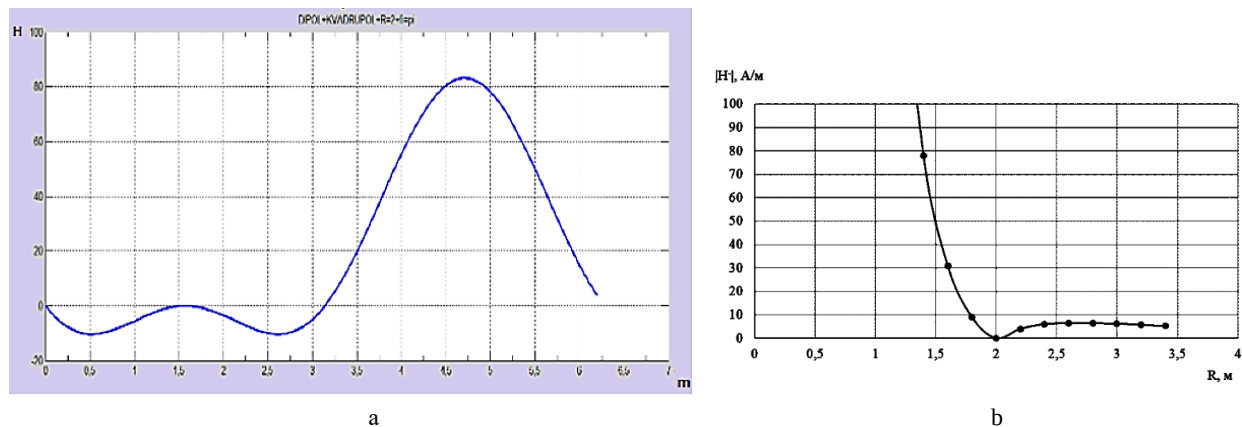


Fig. 1. Change in the magnetic field strength near a four-pole electric machine: a – modeling the value of the magnetic field strength in the plane around the electric machine (3.14 corresponds to π ; 6.28, respectively 2π); b – measured change in magnetic field strength with distance from the electrical machine

For a dipole-octupole field, its zero value can be on closed lines. In the plane $\theta=\pi/2$, there is only one component of the magnetic field H_0 with exponents $n = 1, 3$:

$$H_0 = H_{010} + H_{030} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 a_{30} - a_{10} \right].$$

That is, in the plane θ in the angle $0 < \varphi < 2\pi$ along the entire circle $H_0=0$ on a distance:

$$\frac{R}{R_0} = \sqrt{\frac{3a_{30}}{2a_{10}}}.$$

These ratios, in addition to clarifying the safe zones, allow you to correctly select the places for monitoring the electromagnetic environment.

Accounting for a large number of spatial field harmonics allows you to calculate the field strength at any point around the electric machine and indicate them graphically.

But it is important to choose a sufficient number of harmonics to determine the strength of the magnetic fields with the required accuracy.

Minimizing the number of harmonics taken into account reduces the volume of calculations and simplifies the field propagation modeling processes.

As shown in [7], in the external magnetic field of multipole electrical machines, in addition to the intrinsic spatial harmonic with the exponent $n = p$, there is the first (dipole) harmonic. At the surface of an electric machine, the dipole harmonic is approximately 20% of the magnetic field strength of the natural harmonic. But its level decreases more slowly than the main one, therefore it gradually compares with it, and prevails at a greater distance. This is the reason for the appearance of zero field points.

In the presence of a dipole harmonic, the maximum value of the field strength H_φ is achieved at $\varphi=0$, $\theta=\pi/2$:

$$H_\varphi = \frac{1}{4\pi} \times \left[b_{nn} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{n+2} + b_{11} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \right].$$

As shown in [7], the relative level of higher spatial harmonics:

$$K = \frac{H_{nn}}{H_{11}} = \frac{b_{nn}}{b_{11}} \times \left(\frac{R_0}{R} \right)^{n-1},$$

and given that: $b_{11} = 0, 2b_{nn}$,

$$K = 5 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{n-1}.$$

That is, it is possible to calculate the relative level of higher spatial harmonics for any ratios R_0/R (Table 1).

Table 1 – The relative level of the higher spatial harmonics of the magnetic field K for different relative distances from the electric machine

R_0/R	K						
	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$
2/3	3,33	2,22	1,48	0,99	0,66	0,44	0,29
1/2	2,50	1,25	0,63	0,31	0,16	0,08	0,04
1/3	1,67	0,56	0,19	0,06	0,02	-	-
1/4	1,25	0,31	0,08	0,02	-	-	-
1/5	1,00	0,20	0,04	-	-	-	-

As can be seen from the table, for smaller relative dimensions of the electric machine a smaller number of spatial harmonics should be taken into account. For example, for $R_0/R=2/3$ even the eighth harmonic gives about 30% of the first, and for the second $R_0/R=1/5$ the fifth harmonic becomes insignificant.

This makes it possible to rationalize the processes of modeling the spatial propagation of magnetic fields of electrical machines with the necessary accuracy (permissible error) for determining the field strengths at any point.

Conclusions

1. For modeling of the propagation magnetic fields around multi-pole electrical machines, it is necessary to take into account the presence of spatial harmonics the magnetic field. To create software, it is advisable to use the solution of the Gauss equation for a scalar potential in spherical coordinates. Verification of the modeling results, taking into account two harmonics, proved the possibility of obtaining results similar to the experimental ones.

2. The use of the above calculation apparatus allows one to determine the points of zero magnetic field around electrical machines and their actual location, which is not symmetrical in a full turn around the machine. By increasing the number of machine poles to eight, zero field lines can be defined around it.

3. It is shown that in order to ensure the required accuracy when modeling the field propagation (permissible error), one should take into account the relative dimensions the electric machine (the ratio of the conditional radius of the machine to the distance of determining the magnetic field strength). At smaller relative sizes, a smaller number of spatial harmonics is taken into account. This simplifies the process of modeling the propagation the field depending on its objectives.

REFERENCES

- Podoltsev, O.D. and Kucheriava I.N. (2015), "Mul'tyfyzycheskiye processy v oblasti vklucheniya polyetylenovoy yzolyatsyy sylovogho kabelja [Multiphysical processes in the field of inclusion of polyethylene insulation of a power cable]", *Tekhnichna Elektrodynamika*, Iss. 3, pp. 3–9 (In Russian).
- Sukach, S., Riznik, D., Zachepa, N. and Chencheyov, V. (2020), "Normalization of the Magnetic Fields of Electrical Equipment in Case of Unauthorized Influence on Critical Information Infrastructure Facilities", *Soft Target Protection*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Theoretical Basis and Practical Measures, pp. 337–349, URL: <https://www.springerprofessional.de/normalization-of-the-magnetic-fields-of-electrical-equipment-in-/17766772/>.
- Levchenko, L.O., Sukach, S.V. and Konovalova, O.V. (2014), "Modeljuvannja prostorovykh rozpodiliv maghnytnykh poliv elektrychnykh mashyn dla vyznachennja zon bezpechnogho перебування персоналу [Modeling of spatial distributions magnetic fields electric machines to determine areas of safe stay of personnel]", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Is. 6 (89), Part. 1, pp. 27–31 (In Ukrainian).
- Primin, M. A. and Nedaivoda, I.V. (2015), "Alghorytm anatomicheskogho resheniya obratnoj zadachy maghnytostatyky dla ystochnyka polja dypolnogo typu [Algorithm for the anatomical solution of the inverse problem magnetostatics for a dipole-type field source]", *Computing tools, networks and systems*, Is. 14, pp. 5–15 (In Russian).
- Khodakovsyi, O., Levchenko, L., Kolumbet, V. and Kozachuk, A. (2021), "Rozrakhunkovyj aparat modeljuvannja poshyrennja elektromaghnitnykh poliv riznorydnykh dzherel [Computational apparatus for modeling the propagation of electromagnetic fields dissimilar sources]", *Advanced information systems*, Vol. 5, Iss. 1, pp. 34–38, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04> (In Ukrainian).
- Volokhov, S. A. and Dobrodeev, P.N. (2006), "Закономерности распределения внешнего магнитного поля электрооборудований [Patterns of distribution of the external magnetic field of electrical equipment]", *Electrical Engineering*, Is. 4, pp. 28–33 (In Russian).
- Getman, A. V. (2011), "O normyrovanny urovnja maghnytnogho polja s pomoshhju mul'typolnykh maghnytnykh momentov [On normalization of the magnetic field level using multipole magnetic]", *Eastern European Journal of Advanced Technology*, Vol. 4, No 5., pp. 7–10 (In Russian).
- Getman, A. (2018), "Cylyndrychnyj gharmonichnyj analiz maghnytnogho polja v aperturi nadprovidnoji obmotky elektromaghnita [Development of a method for reducing the structure of the magnetic field in the aperture of a quadrupole electromagnet with an overwire winding]", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5 (91)), pp. 4–9, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123607> (In Ukrainian).
- Getman, A. (2018), "Rozrobka sposobu pokrashennja struktury maghnytnogho polja v aperturi kvadrupolnogo elektromaghnita z nadprovidnoju obmotkoju [Development of a method for improving the structure of the magnetic field in the aperture of a quadrupole electromagnet with a superconducting winding]", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(5 (95)), pp. 6–12, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142163> (In Ukrainian).

Received (Надійшла) 30.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.04.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Левченко Лариса Олексіївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна;

Larysa Levchenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky KPI», Kyiv, Ukraine;
e-mail: larlevch@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7227-9472>

Глива Валентин Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури Київ, Україна;

Valentyn Glyva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;
e-mail: glyva.valentin@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1257-3351>

Бурдейна Наталія Борисівна – кандидат педагогічних наук, доцент, проректор з навчальної та організаційно-виховної роботи Київського національного університету будівництва і архітектури Київ, Україна;

Nataliia Burdeina – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Educational and Organizational-Educational Work of the Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;
e-mail: burdeina.nb@knuba.edu.ua; ORCID ID: orcid.org/0000-0002-2812-1387

Математичний апарат моделювання поширення магнітного поля електричних машин із заданою точністю

Л. О. Левченко, В. А. Глива, Н. Б. Бурдейна

Анотація. Проблемою моделювання поширення магнітних полів локальних та розсереджених у просторі джерел є великі похибки порівняно натурними вимірюваннями. Важливим аспектом адекватного моделювання є застосування коректного математичного апарату. Показано, що для отримання достовірних моделей поширення магнітних полів навколо електричних машин (генераторів, електродвигунів різної потужності, геометричних розмірів та полюсності) доцільно застосовувати рівняння Гауса для скалярного потенціалу. Розв'язок рівняння у полярних координатах дозволяє врахувати не тільки основну, а і інші гармоніки магнітного поля (дипольну, квадрупольну, октупольну). Це дозволяє у залежності кількості врахованих просторових гармонік отримати модель з потрібною точністю (похибкою) прогнозування напруженості магнітного поля у будь-якій точці навколо машини. У роботі вважається, що електрична машина є об'єктом базового радіусу R_0 . Наведений підхід дозволяє однозначно визначити розташування точок нульового поля на певній відстані від джерела (для квадрупольного джерела та ліній нульового поля, для октупольного джерела). Наведено результати моделювання та його верифікації натурними вимірюваннями для найбільш поширених чотириполюсних машин (квадрупольне джерело). Головною задачею моделювання поширення магнітного поля таких джерел є забезпечення потрібної точності, виходячи з цілей моделювання. Показано, що точність моделювання та наявність точок нульового поля обумовлені різними рівнями поля біля корпусу електричної машини для різних гармонік. Дипольна гармоніка біля корпусу складає 20 % власної гармоніки. Але вона спадає повільніше з відстанню. Це обумовлює необхідність врахування різної кількості гармонік у залежності від значення співвідношення R_0/R , R – відстань до точки визначення напруженості поля від джерела. Тому за співвідношення $R_0/R=2/3$ суттєвою є восьма гармоніка. За $R_0/R=1/5$ вже четвертою просторовою гармонікою можна нехтувати. Такі дані дозволяють обрати раціональну кількість гармонік. Це зменшує обсяги обчислень і спрощує процес моделювання поширення магнітного поля навколо джерела.

Ключові слова: моделювання; розрахунковий апарат; електрична машина; просторова гармоніка; диполь.

Математический аппарат моделирования распространения магнитного поля электрических машин с заданной точностью

Л. О. Левченко, В. А. Глива, Н. Б. Бурдейна

Проблемой моделирования распространения магнитных полей локальных и рассредоточенных в пространстве источников являются большие погрешности по сравнению с натурными измерениями. Важным аспектом адекватного моделирования является применение корректного математического аппарата. Показано, что для получения достоверных моделей распространения магнитных полей вокруг электрических машин (генераторов, электродвигателей разной мощности, геометрических размеров и полюсности) целесообразно применять уравнение Гаусса для скалярного потенциала. Решение уравнения в полярных координатах позволяет учесть не только основную, но и другие гармоника магнитного поля (дипольную, квадрупольную, октупольную). Это позволяет в зависимости от количества учтенных пространственных гармоник получить модель с нужной точностью (погрешностью) прогнозирования напряженности магнитного поля в любой точке вокруг машины. В работе считается, что электрическая машина является объектом базового радиуса R_0 . Приведенный подход позволяет однозначно определить расположение точек нулевого поля на определенном расстоянии от источника (для квадрупольного источника и линий нулевого поля, для октупольного источника). Приведены результаты моделирования и их верификации натурными измерениями для наиболее распространенных четырехполюсных машин (квадрупольный источник). Главной задачей моделирования распространения магнитного поля таких источников является обеспечение требуемой точности, исходя из целей моделирования. Показано, что точность моделирования и наличие точек нулевого поля обусловлены разными уровнями поля у корпуса электрической машины для разных гармоник. Дипольная гармоника у корпуса составляет 20% собственной гармоника. Но она спадает медленнее с расстоянием. Это обуславливает необходимость учета разного количества гармоник в зависимости от значения соотношения R_0/R , R – расстояние до точки определения напряженности поля от источника. Поэтому при соотношении $R_0/R=2/3$ существенной является восьмая гармоника. При $R_0/R=1/5$ уже четвертой пространственной гармоникой можно пренебрегать. Такие данные позволяют выбрать оптимальное количество гармоник. Это уменьшает объемы вычислений и упрощает процесс моделирования распространения магнитного поля вокруг источника.

Ключевые слова: моделирование; расчетный аппарат; электрическая машина; пространственная гармоника; диполь.

Bohdan Rezanov, Heorhii Kuchuk

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine

MODELING THE PROCESS OF TWO-FACTOR AUTHENTICATION

Abstract. The relevance of research. Authentication is the process of confirming the authenticity of an object or subject of interaction in an information network by a presented identifier. Usually only one factor is used. However, most information security incidents occur due to the use of one factor. The easiest way to create an extra layer of security for accounts is to use two-factor authentication using 2FA programs. In this case, an additional step occurs, which increases the user authentication time and creates an additional load on the network. Thus, there is a need to create an additional layer of security for accounts in the “Active Directory” directory service without using an additional component on the target system and an additional step in the authentication process, thereby making the authentication process itself simpler and more responsive to the user. **The purpose of the article** is to develop a model of the two-factor authentication process, which will allow comparison of different approaches to its implementation. **Research progress.** The proposed model consists of three components: a system submodel, a threat submodel, and a security properties submodel. The analysis performed showed the advantages of using the PERT method for this problem. The simulation of the authentication process was carried out using a third-party service for checking the second factor (DUO) and the proposed method. The final PERT-diagrams are formed. A comparative analysis of these methods in terms of authentication speed was carried out. **Conclusion.** The developed model makes it possible to assess the quality of two-factor authentication by the selected parameter with a sufficient degree of accuracy. In particular, the proposed method showed more preferable results in terms of authentication speed compared to conventional methods.

Keywords: authentication, 2FA program, model, PERT method.

Introduction

Information security tools used by companies include authentication, identification, authorization, integrity checking. They are designed to protect legitimate users of the information system from illegal actions of intruders.

Authentication is the process of confirming the authenticity of an object or subject of interaction in an information network by a presented identifier. The main authentication method is single factor authentication. However, in a number of studies [1-4] it is noted that most incidents in the field of information security occur due to the use of one factor.

Studies have shown that the easiest way to create an additional layer of security for accounts is to use two-factor authentication [5-10]. The main types of two-factor authentication are:

- one-time passwords on paper (printable set of codes);
- sending a temporary code to an e-mail address;
- sending one-time password via SMS;
- OTP tokens (hardware one-time password generators);
- 2FA programs (Authenticator class applications).

A promising view is the use of 2FA programs, since it is possible to individually adjust the time interval for generating one-time passwords. For authentication and authorization of users, as a rule, directory service is used. A directory service is a network service that identifies all network resources and makes them available to users. The directory service centrally stores all the information required to use and manage these objects, simplifying the process of finding and managing these resources [11]. Examples of such services are Samba server, FreeIPA, Apache Directory Server, OpenLDAP, 389 Directory Server, Active Directory.

The Active Directory – directory service, unlike those listed above, is secure, distributed, segmented and replicated, which allows for simplified administration, scalability, support for open standards, and support for standard name formats [12]. This directory service uses LDAP [13], Kerberos [14] authentication protocols. Based on the RFC of these protocols, despite the security of the protocols themselves, they do not ensure the security of the authentication process itself on the part of the user, they do not support two-factor authentication, since authentication through these protocols occurs using one factor.

However, there are solutions to integrate the second factor into such directory services using third-party components on systems where authentication is required. An example of such solutions are the developments of Duo, Okta.

The works [15, 16] describe the authentication process using a third-party component. It is worth paying attention to the fact that in this approach, there is an additional step during authentication, which complicates the process. This increases the user authentication time and creates an additional load on the network.

Thus, there is a need to create an additional layer of security for accounts in the Active directory service without using an additional component in the target system and an additional step in the authentication process, thereby making the authentication process itself simpler and more responsive to the user. To solve this problem, it is necessary to resort to design, the initial stage of which is the development of a model. The model will allow us to study at each stage the effectiveness of the integration of two-factor authentication into authentication services with centralized user databases and evaluate the effectiveness of the work as a whole and at individual stages.

Therefore, **the purpose of this article** is to develop a model of the two-factor authentication process, which

will allow us to compare different approaches to its implementation.

At the first stage of research, a modeling method was chosen, at the second stage, a model of a standard authentication process based on the PERT method was developed, at the third stage, the proposed method was modeled.

At the final stage, using the developed model, a comparative analysis of these methods in terms of authentication speed was carried out.

Main material

1. Choice of modeling method. The security model should consist of three components [17]:

system sub-model that clearly defines the system of interest in order to understand how it behaves during operation, as well as unintentional changes in operating conditions;

threat sub-model to clearly define the computing resources of attackers and their ability to access the system;

sub-model of security properties, in which properties must be clearly defined to prevent malicious actions.

There are many methods and approaches to modeling various systems. To model our system, the following methods were considered.

GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) is an alternative probabilistic method for network planning. The method is used in the organization of work, its main principle is that subsequent tasks can begin after the completion of only a certain number of previous tasks. However, not all tasks presented on the network model must be completed to complete the project.

CPM (Critical path method) is a method based on determining the longest sequence of tasks from the beginning of the project to its completion, taking into account all the relationships of the project, which is called the critical path. Tasks that lie on the critical path (*critical tasks*) have zero lead time, and if their duration changes, the timing of the entire project changes. For other tasks, a possible reserve of time is calculated.

PERT (Program Evaluation and Review Technique) is a project evaluation and analysis method used in project management. The method is aimed at analyzing the time required to complete each individual task. It also determines the minimum time required to complete the entire project.

In the PERT method, projects are viewed as a network of individual events and activities. Work in them is any element of the project that takes time to complete, and which can suspend the start of other work. The method is based on the idea of determining and controlling the probable terms of the critical path of the entire complex of works (or a probabilistic approach using the average value of the β -distribution). The PERT method allows for possible fluctuations in the timing of each operation and analyzes their impact on the completion of the project as a whole.

Benefits of the PERT method:

- provides a graphical representation of the project and its main activities;

- allows you to set the duration range for each activity;

- makes it possible to obtain information about the expected completion time of the project, provides an estimate of the probability of completing the project before the specified date;

- identifies activities that have slack time and therefore their delay will not affect the duration of the project as a whole;

- identifies activities on the critical path that need close monitoring, as they affect the overall time to complete the project [18].

Using the PERT method, one can analyze the time required to complete each individual task and determine the minimum time required to complete the entire project [19].

Disadvantages of the PERT method:

- human factor, subjective analysis and inaccurate estimates may affect the timing;

- updating and maintaining the calendar requires a lot of time and money;

- complexity of management, there is no guarantee that the schedule will remain the same throughout the project.

The GERT method [20] is an alternative probabilistic method for network planning. The basis of the application of the GERT method is the use of alternative networks, called GERT networks. These networks can adequately define complex production processes in cases where it is difficult to clearly define what work and in what order must be done to achieve the goal of the project.

The basis of the application of the GERT method is the use of alternative networks, called GERT networks in terms of this method.

They allow you to more adequately set complex project processes in cases where it is difficult or impossible (for objective reasons) to unambiguously determine what kind of work and in what sequence should be performed to achieve the intended result (i.e. there is a multi-variant implementation of the project).

The GERT-based modeling method is based on the use of weights, and is especially useful in work organization cases where subsequent tasks can start after only a certain number of predecessor tasks have completed. One of the significant disadvantages of GERT networks is their high computational complexity [21, 22]. Given that for the system being developed, the process that needs to be modeled has a clear sequence, we can give preference to the PERT method.

2. Modeling the Authentication Process. Let's simulate the authentication process using a third-party second factor verification service (DUO). A general view of the process in the form of a diagram is presented in Fig. 1.

The following steps are performed (Fig. 1):

- 1) user enters login, password, OTP into the user system (Windows);

- 2) user system (Windows) sends the user's login and password to Active Directory for verification;

- 3) Active Directory returns a response to the user system (Windows);

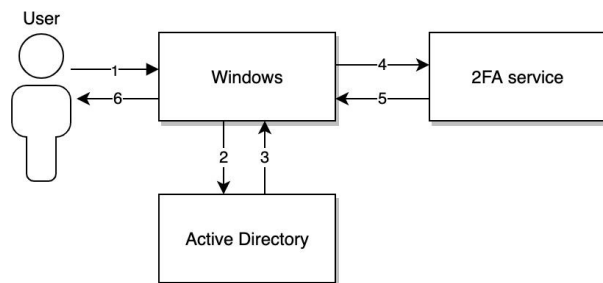


Fig. 1. Standard scheme of the authentication process using a third-party second factor verification service

4) user system, with a satisfactory response, sends the user's login and OTP for verification to the second factor verification service (DUO);

5) second factor check service returns a response to the user system (Windows);

6) user system (Windows) with a satisfactory response grants access to the user.

PERT chart consists of separate typical blocks (Fig. 2). Each block contains seven sections with such information about the task [12]:

- in the Master password generator section, the number or name of the task is displayed;

Early Start	Duration	Early Finish
Master password generator		
Late Start	Slack	Late Finish

Fig. 2. View of a typical block of PERT charts

- Early Start section displays the earliest start, the earliest start date for the task;
- Duration section displays the duration of the task, calculated using the PERT method;
- in the Early Finish section, the earliest finish, the earliest deadline for completing the task, is displayed;
- in the Late Finish section, the late finish is displayed, the latest deadline for completing the task;
- Slack section shows the amount of time left to complete the task without affecting the end date of the project;
- in the Late Start section, the late start is displayed, the latest start date for the task.

An example of a PERT diagram for the considered process is shown in Fig. 3.

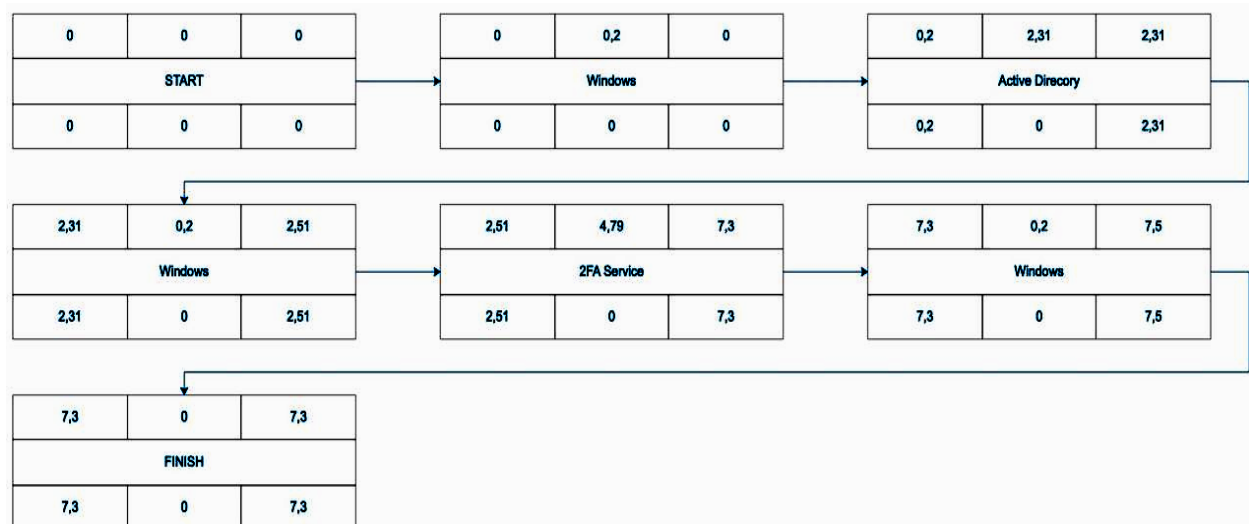


Fig. 3. An example of a PERT diagram of the authentication process using a third-party second factor verification service

3. Suggested method. Consider the proposed approach to the authentication process using a third-party service for checking the second factor. A sequence of actions is proposed, shown in Fig. 4.

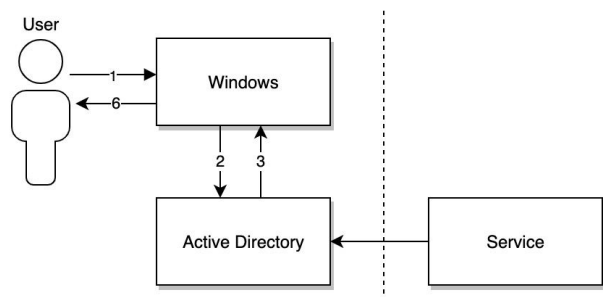


Fig. 4. Proposed Scheme for the Authentication Process

The proposed method performs the following actions (Fig. 4):

- 1) user enters the login, password, OTP into the user system (Windows)
 - 2) user system (Windows) sends the user's login and password to Active Directory for verification
 - 3) Active Directory returns a response to the user system (Windows)
 - 4) user system (Windows) if the answer is satisfactory, the system grants access to the user
- Note that the operations

Service → Active Directory

does not affect the user authentication process.

An example of a PERT chart based on this process is shown in Fig. 5.

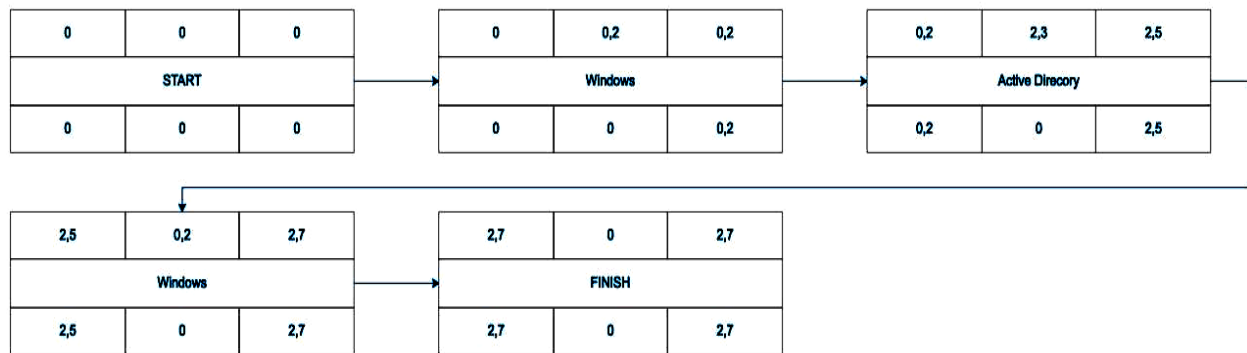


Fig. 5. Example PERT Diagram for the Proposed Authentication Process Method

4. Case study. To compare services, you need to test the authentication speed.

The following stand was prepared for testing. Oracle VM VirtualBox was taken as the basis for virtualization. For the server part, Windows Server 2019 is used, as well as Active Directory, a Microsoft directory service for operating systems of the Windows Server family.

For the client part, Windows 10 is used, an operating system for personal computers and workstations developed by Microsoft as part of the Windows NT family.

Test bench host machine: CPU 6-Core Intel Core i7, 2.2 GHz; RAM 16GB 2400Mhz DDR4; SSD 256 GB RAM; LAN 1GBps; Internet 1GBps.

Test bench virtual machines: Windows Server 2019 (CPU 4 Core; RAM 8GB; Drive 64GB; LAN 1GBps); Windows 10 (CPU 2 Core; RAM 4GB; Drive 64GB; LAN 1GBps).

Communication between virtual machines is provided through a bridge connection with the host machine.

The difference between the compared systems is that in the case of DUO, it is necessary to install an additional component in the client part, Winlogon is a component of Microsoft Windows operating systems that is responsible for processing the sequence of safe attention, loading the user profile at logon and, if necessary, locking the computer when the splash screen is running (another authentication step is required).

The actual retrieval and validation of user credentials is left to other components.

No additional components are needed for the developed system.

Testing will be done with a base of 1000 users. Before testing, 1000 accounts were created in Active Directory, 1000 accounts were created in the DUO system and 1000 TOTP tokens were issued.

The results of authentication testing using the second factor verification service are shown in Table 1 and Fig. 6.

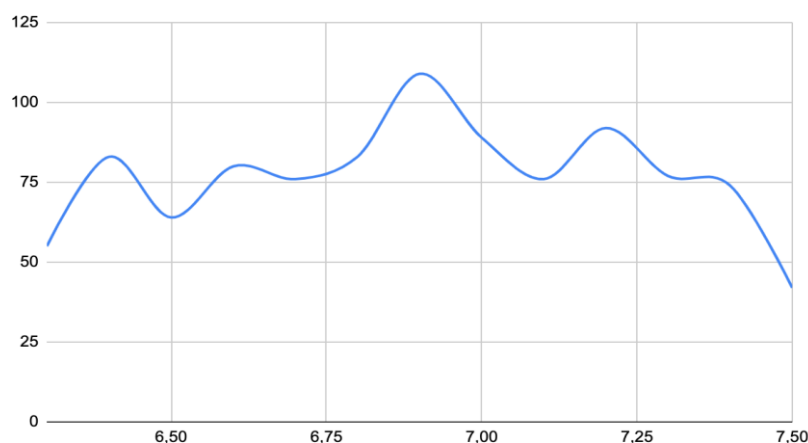


Fig. 6. Test results (standard method)

Table 1 – Testing the Standard Method

Time	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9
Frequency	55	83	64	80	76	83	109
Time	7	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	
Frequency	89	76	92	77	74	42	

The table shows that the minimum time to complete the login operation with this approach is 6.3 s.

The maximum is 7.5 s., And the average authentication time is 6.9 s.

The results of authentication testing using the proposed method are given in Table 2.

Authentication testing results using the developed system:

Table 2 – Testing the proposed method

Time	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
Frequency	56	96	123	118	93	100
Time	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	
Frequency	91	95	88	95	45	

From the obtained results, it follows that the minimum time to complete the login operation is 2.1 s., the maximum is 3.1 s., and the average authentication time is 2.6 s.

Let's combine the data of tables 1 and 2 on one diagram (Fig. 7, blue color on the left - Table 1, red color on the right - Table 2).

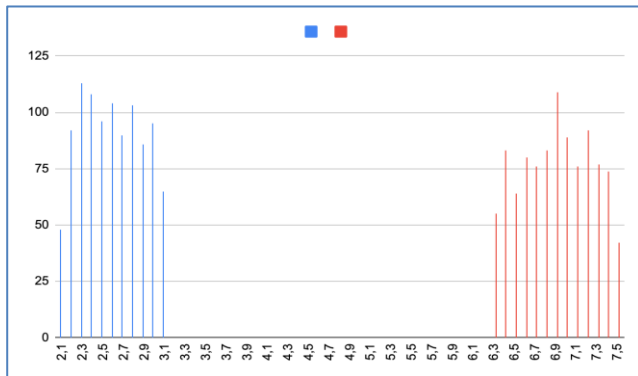


Fig. 7. Authentication Time Analysis

From the diagram in Fig. 7, it is obvious that the proposed method in terms of the proposed parameter is

significantly more efficient than the standard one (almost 3 times).

Conclusions

The article presents a model of the two-factor authentication process, which made it possible to compare different approaches to its implementation. The proposed model consists of three components: a system submodel, a threat submodel, and a security properties submodel.

The analysis performed showed the advantages of using the PERT method for this problem. The developed model made it possible to assess the quality of two-factor authentication by the selected parameter with a sufficient degree of accuracy.

In particular, the simulation of the authentication process was carried out using a third-party second factor verification service (DUO) and the proposed method.

The final PERT-diagrams are formed. A comparative analysis of these methods in terms of authentication speed was carried out.

The proposed method showed more preferable results in terms of authentication speed compared to conventional methods.

REFERENCES

- (2021), *Two-factor authentication*, available at: <http://www.aladdin-rd.ru/solutions/authentication>.
- (2021), *Setting up two-factor authentication*, available at: <http://support.citrix.com/proddocs/topic/web-interface-imping-ton/nl/ru/wi-configure-two-factor-authentication-gransden.html?locale=ru>.
- (2020), *Seven Methods for Two-Factor Authentication*, available at: <http://www.infosecurityrussia.ru/news/29947>.
- (2020), *Two-factor authentication for remote access*, available at: <http://itc.ua/articles/dvuhfaktornaya-autentifikaciya-pri-udalen-nom-dostupe-23166>.
- Evseev S.P. and Korol, O.G. (2014), "Study of two-factor authentication methods", *Information processing systems*, No. 2(118), pp. 81–87.
- Belov, V.N. and Pushkova, K.S. (2017), "User account protection in modern gadgets", *Scientific trends: Issues of exact and technical sciences*, 12 MC, MOAN, St. Petersburg, pp. 8-9.
- Uskova, S.I. and Kamshilov, S.G. (2018), "Ensuring information security in the interaction of business entities with banking structures", *XVII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*, ChGU, Chelyabinsk, Vol. 2, pp. 190-195.
- Claudia, Ziegler, Acemyan, Philip, Kortum, Jeffrey, Xiong and Dan S., Wallach (2018), "2FA Might Be Secure, But It's Not Usable: A Summative Usability Assessment of Google's Two-factor Authentication (2FA) Methods", *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol 62, Issue 1, DOI: <https://doi.org/10.1177/1541931218621262>.
- (2020), *Methods Departments of Psychological Sciences1 and Computer Science*, Rice University 6100 Main Street, MS-25, Houston, Texas 77005, USA.
- Kulikova, O.V. (2010), "Methods and means of authentication in the tasks of ensuring information security in corporate information systems", *Information technology security*, Volume 17, No. 3, pp. 85-91.
- Ivanova, A.S. and Gazizov, A.R. (2018), "Methods of authentication and identification of information systems of educational organizations" *Scientific vector*, Issue 4.
- Chizhikov, Dmitry (2021), "Lecture 1: Introduction to Active Directory", *Microsoft Active Directory Implementation Methodology*, available at: <https://intuit.ru/studies/courses/1068/259/lecture/6608>.
- (2015), "Directory Service", *Information system administrator functions*, available at: <https://helpiks.org/5-87570.html>.
- Sermersheim, J. (2006), *Lightweight Directory Access Protocol (LDAP): The Protocol*, Ed. Novell, Inc., June 2006.
- (2021), *RFC4120*, available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4120>.
- Derek, Simmel and Shane, Filus (2017), "Flexible Enforcement of Multi-factor Authentication with SSH via Linux-PAM for Federated Identity Users", *PEARC17: Proceedings of the Practice and Experience in Advanced Research Computing 2017 on Sustainability, Success and Impact July 2017*, Article 10, pp. 1–9, DOI: <https://doi.org/10.1145/3093338.3093392>.
- Wenyi, Liu, Selcuk Uluagac, A. and Raheem, Beyah (2020), "MACA: A Privacy-Preserving Multi-factor Cloud Authentication System Utilizing Big Data", *The School of ECE Georgia Institute of Technology Atlanta*, GT CAP Group, GA 30332, USA, available at: <https://cap.ece.gatech.edu/papers/1569883983.pdf>.
- Jason, Bau and John C., Mitchell (2011), "Security Modeling and Analysis", *IEEE Security & Privacy*, May-June 2011, Vol. 9, Is. 3, pp. 18-25, DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2011.2>.
- Fridlyanov, M.A. (2017), "Methods and techniques of project management in the sphere of industrial production", *Problems of market economy*, No. 3, pp. 17–24.
- Murtuzov, G.A. (2020), "Methods for determining the timing of construction", *Alley of Science*, No. 5 (44), available at: https://alley-science.ru/domains_data/files/4May2020/METODY%20OPREDELENIYA%20SROKOV%20STROITELSTVA.pdf

21. Antonova, A.S. and Aksenov, K.A. (2014), "Comparative analysis of subcontracting work planning methods", *Modern problems of science and education*, No. 3, pp. 88-97, available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13388>.
22. Panfilova, T.A. (2017), *Stochastic adaptive algorithms for improving software*, diss ... cand. tech. sciences: 05.13.01 Krasnoyarsk, 160 p.
23. (2021), *Method GERT*, available at: <http://www.topknowledge.ru/investmen/3187-metod-gert.html&sa=D&source=docs&ust=1638475515309000&usg=AOvVaw1Yhcjwrn-h7852e944lhZR>

Received (Надійшла) 19.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.05.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Резанов Богдан Михайлович – аспірант, кафедра комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Bohdan Rezanov – PhD Student of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: brezanov@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4113-8781>.

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>.

Моделирование процесса двухфакторной аутентификации

Б. М. Резанов, Г. А. Кучук

Анотація. Актуальність дослідження. Аутентифікація – процес підтвердження справжності об'єкта або суб'єкта взаємодії в інформаційній мережі за пред'явленим ідентифікатором. Зазвичай при цьому використовується один чинник. Проте, більшість інцидентів у сфері інформаційної безпеки трапляються внаслідок використання одного фактору. Найбільш простим способом створити додатковий рівень безпеки для облікових записів є використання двофакторної аутентифікації з використанням 2FA-програм. При цьому виникає додатковий крок, який збільшує час аутентифікації користувача, створює додаткове навантаження на мережу. Таким чином, виникає необхідність створити додатковий рівень безпеки для облікових записів у службі каталогів Active directory без використання додаткового компонента в цільовій системі і додаткового етапу в процесі аутентифікації, тим самим роблячи сам процес аутентифікації більш простим і доступним для користувача. **Метою статті** є розробка моделі процесу двофакторної аутентифікації, яка дозволить провести порівняння різних підходів для його реалізації. **Хід досліджень.** Пропонована модель складається з трьох компонентів: підмодель системи, підмодель загрози та підмодель властивостей безпеки. Проведений аналіз показав переваги використання для даного завдання методу PERT. Проведено моделювання процесу аутентифікації з використанням стороннього сервісу перевірки другого фактору (DUO) та запропонованого методу. Сформовано підсумкові PERT-діаграми. Проведено порівняльний аналіз даних методів за швидкістю аутентифікації. **Висновок.** Розроблена модель дозволяє з достатнім ступенем точності оцінити якість двофакторної аутентифікації за вибраним параметром. Зокрема, запропонований метод показав кращі результати за швидкістю аутентифікації порівняно з загальноприйнятими методами.

Ключові слова: аутентифікація, 2FA-програма, модель, метод PERT.

Моделирование процесса двухфакторной аутентификации

Б. М. Резанов, Г. А. Кучук

Аннотация. Актуальность исследования. Аутентификация – процесс подтверждения подлинности объекта или субъекта взаимодействия в информационной сети по предъявленному идентификатору. Обычно при этом используется один фактор. Однако, большинство инцидентов в сфере информационной безопасности случаются вследствие использования одного фактора. Наиболее простым способом создать дополнительный уровень безопасности для учетных записей является использование двухфакторной аутентификации с использованием 2FA-программ. При этом возникает дополнительный шаг, который увеличивает время аутентификации пользователя, создает дополнительную нагрузку на сеть. Таким образом, возникает необходимость создать дополнительный уровень безопасности для учетных записей в службе каталогов Active directory без использования дополнительного компонента в целевой системе и дополнительного этапа в процессе аутентификации, тем самым делая сам процесс аутентификации более простым и отзывчивым для пользователя. **Целью статьи** является разработка модели процесса двухфакторной аутентификации, которая позволит провести сравнение различных подходов к его реализации. **Ход исследования.** Предлагаемая модель состоит из трех компонентов: подмодель системы, подмодель угрозы и подмодель свойств безопасности. Проведенный анализ показал преимущества использования для данной задачи метода PERT. Проведено моделирование процесса аутентификации с использованием стороннего сервиса проверки второго фактора (DUO) и предложенного метода. Сформированы итоговые PERT-диаграммы. Проведен сравнительный анализ данных методов по скорости аутентификации. **Вывод.** Разработанная модель позволяет с достаточной степенью точности оценить качество двухфакторной аутентификации по выбранному параметру. В частности, предложенный метод показал более предпочтительные результаты по скорости аутентификации по сравнению с общепринятыми методами.

Ключевые слова: аутентификация, 2FA-программа, модель, метод PERT.

Г. М. Хорошун, О. І. Рязанцев, М. О. Коверга, С. А. Покришка

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєвєродонецьк, Україна

МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПЕРЕДБАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАХВОРИЛИХ НА COVID-19 В УКРАЇНІ ТА ІНДІЇ

Анотація. Побудовані моделі передбачення кількості захворілих на COVID-19 з використанням методів машинного навчання. Побудовані моделі навчалися на даних зібраних з різних офіційних джерел, включаючи Всесвітню Організацію Здоров'я, з початку епідемії до теперішнього часу. Для навчання моделей передбачення кількості захворілих на COVID-19 обрано Україну та Індію. Методами, що надали високу точність прогнозу для існуючих даних, виявились алгоритми лінійної регресії для України та градієнтного бустингу для Індії. Аналіз даних проводився за допомогою мови програмування Python, з використанням бібліотеки Sklearn, яка побудована на основі SciPy (Scientific Python). Крім того, використовувалась бібліотека алгоритму градієнтного бустингу XGBoost. Для розробки моделі обрано багатофакторне прогнозування часових рядів з використанням у якості предикаторів запізнення часового ряду. Визначено характеристики, що враховуються при навчанні моделі, а саме: дата початку події, день тижня, номер тижня, місяць та інші. Проведено аналіз щодо визначення впливу цих параметрів на якість навчання моделі. Оцінені похибки моделей та точність прогнозу з найкращими показниками 0.83 для України та 0.75 для Індії. Побудовані моделі дозволяють передбачати епідеміологічну ситуацію в майбутньому, координувати дії у різних галузях охорони здоров'я та проводити обґрунтовані превентивні заходи на державному рівні.

Ключові слова: машинне навчання; моделі прогнозування; метод лінійної регресії; метод градієнтного прискорення.

Постановка та аналіз проблеми

Коронавірусна інфекція 2019 року також відома як COVID-19 (абревіатура від англ. COronaVirus Disease 2019) є епідемією, що охопила країни всього світу. Важкий перебіг захворювання, постковідний синдром та значна кількість летальних випадків [1] призвели до необхідності детального вивчення цього питання та прогнозування.

Цінність і значущість зібраних даних щодо кількості захворювань за певний проміжок часу можна усвідомити, побудувавши моделі, які дозволяють передбачати епідеміологічну ситуацію в майбутньому, координувати дії у різних галузях охорони здоров'я та проводити обґрунтовані превентивні заходи на державному рівні.

Для побудови передбачуваних моделей використовуються набори методів та алгоритмів машинного навчання з області штучного інтелекту, які забезпечують ефективне самонавчання моделі. Вперше визначення поняття машинного навчання, як області досліджень, що дає комп'ютерам здатність вчитися без того, щоб їх явно програмували надане в 1952 році А. Самюелем.

Наразі результати працюючих моделей щодо передбачення ринку, людської поведінки та вирішення задач збільшення прибутку використовують відомі компанії по всьому світу. Основні тренди у штучному інтелекті та методах машинного навчання в різних галузях на сучасному етапі розвитку наведені в роботі [2].

Отже, існує необхідність побудови передбачуваних моделей з використанням методів машинного навчання, які будуть навчатися на існуючій статистиці по кількості захворілих на COVID-19, починаючи з 2019 року.

В ході вирішення множини подібних завдань навчена модель з визначеною точністю буде надавати прогноз по кількості захворілих на обраний період

часу. Актуальність роботи забезпечується сьогоденним епідеміологічним становищем по COVID-19 та зацікавленістю в результатах прогнозу у всіх сферах виробництва та наданні послуг в різних країнах світу.

Загальна задача створення передбачуваних моделей

В якості алгоритмів для навчання моделі, що може передбачити кількість захворілих на COVID-19 в майбутньому пропонується використовувати лінійну регресію [3] та XGBoost [4].

Моделі лінійної регресії може бути формалізована наступним чином. Кількість хворих, визначених в певний день є залежною змінною у. Набір характеристик, які на нашу думку впливають на величину у є незалежні змінні $x = (x_1, \dots, x_n)$, де n – це кількість параметрів. Вважаємо, що залежність між x та y лінійна і описується рівнянням регресії:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

з коефіцієнтами регресії $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ та випадковою помилкою ε . Лінійна регресія обчислює прогнозовані ваги виміру, що позначаються як $b_0, b_1, \dots, b_n$. Вони визначають оцінену функцію регресії

$$f(x) = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n, \quad (2)$$

яка презентує залежність між входами та виходом. Для кожного результату спостереження $i = 1, \dots, n$, оцінена або передбачена відповідь $f(x_i)$ має бути якомога ближчою до відповідної фактичної відповіді y_i . Різниця $y_i - f(x_i)$ всім результатам спостережень називаються залишками. Регресія визначає найкращі прогнозовані ваги виміру, які відповідають найменшим залишкам.

Градієнтний бустинг це метод машинного навчання, який будує модель прогнозування у вигляді ансамблю слабких прогностичних моделей - дерев рішень та використовує фреймворк градієнтного бустингу.

Введемо модель вираженого голосування:

$$h(x) = \sum_{i=0}^n c_i a_i, x \in X, b_i \in R, \quad (3)$$

де X — це простір, в якому знаходяться об'єкти, c_i, a_i — це коефіцієнти моделі та дерева рішень. Припустимо, що на якомусь кроці з допомогою описаних правил вдалося додати у композицію T-1 слабкий алгоритм. Щоб навчитися розуміти, який саме має бути алгоритм на кроці T, введемо функцію помилки:

$$err(h) = \sum_{j=1}^N c_i L\left(\sum_{i=1}^{T-1} a_i c_i(x_j) + c_T a_T(x_j)\right) \rightarrow \min_{a_T c_T}. \quad (4)$$

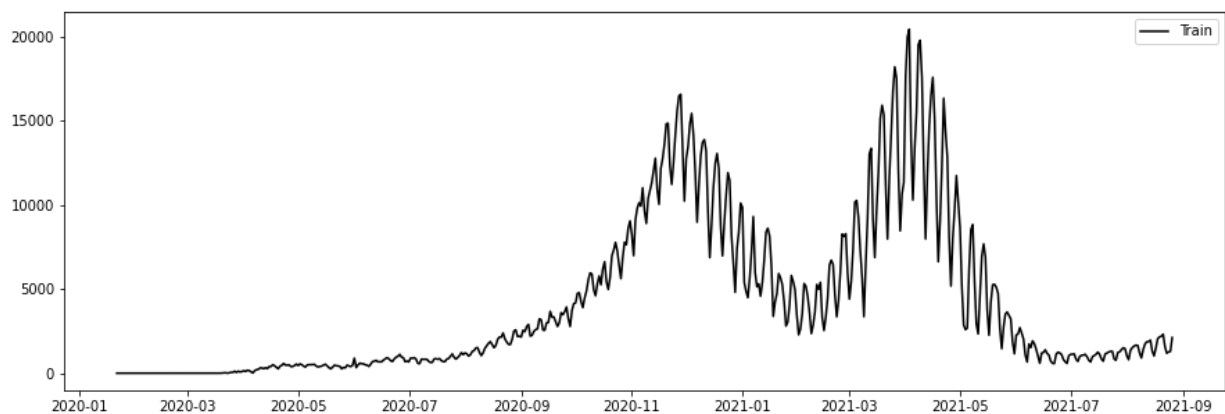
Найкращим алгоритмом буде той, який зможе максимально зменшувати помилку, отриману на попередніх ітераціях. Градієнтний бустинг дозволяє визначати мінімальну помилку.

Аналіз даних проводився за допомогою мови програмування python, з використанням бібліотеки Sklearn -

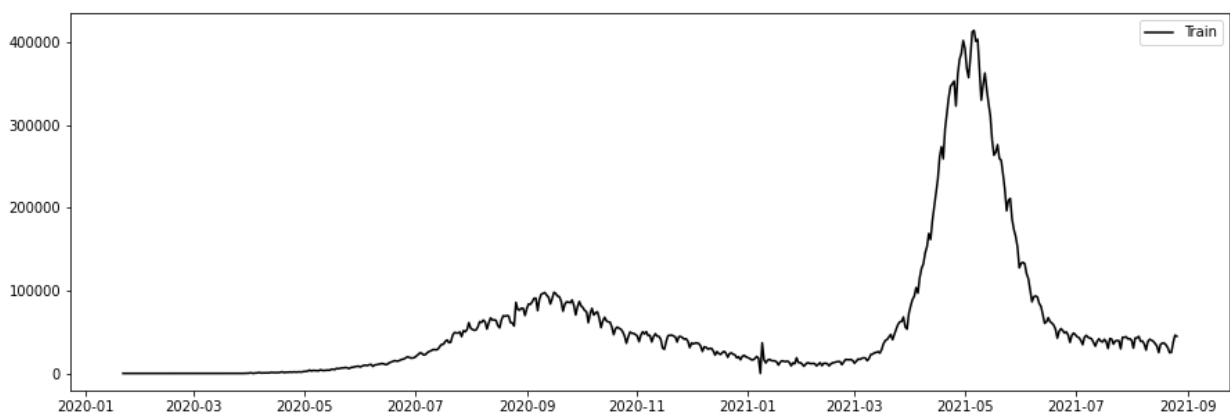
Scikit-learn (Sklearn) з реалізацією цілого ряду алгоритмів для навчання з учителем та без учителя, яка побудована на основі SciPy (Scientific Python). Крім того, використовувалась бібліотека алгоритму градієнтного бустингу XGboost.

Результати роботи моделей

Для проведення порівняльного аналізу можливостей двох методів розглянемо дві країни — Україну та Індію, які відрізняються за кількістю населення та рівнем медичного обслуговування. Набори даних про кількість випадків захворювань на COVID-19 в Україні та Індії завантажено з ресурсу [5] та презентовано на рис. 1. Дані часових рядів фіксують серію точок даних по кількості хворих, записаних через регулярний інтервал, в нашому випадку щодня. Досліджуваний набір даних вміщує наступні змінні: країна, широта, довгота, кількість захворювань по днях починаючи з 22 січня 2020 року до 2021-12-22. На момент дослідження даних, набір вміщує дані по кількості захворювань за 702 дні.



а



б

Рис. 1. Часовий ряд кількості випадків захворювань на COVID-19 в Україні (а) та Індії (б)
(**Fig. 1.** Time series of the number of COVID-19 cases in Ukraine (a) and India (b))

Прогнозування — це визначення величини наступного кроку часового ряду, на якому необхідно передбачити майбутні значення, яке прийме ряд. Розглянуто два методи навчання моделей: лінійна регресія та градієнтний бустинг.

Для розробки моделі обрано багатофакторне прогнозування часових рядів з використанням у якості предикаторів запізнення часового ряду. Визначено характеристики, що враховуються при навчанні моделі, а саме дата початку події, день тижня, номер

тижня, місяць та інші. Проведено аналіз щодо визначення впливу цих параметрів на якість навчання моделі. Підготовлені дані, згідно з загальними рекомендаціями, поділені у відношенні 5:1 для тренувального набору та тестового, що становить 583 та 119 днів відповідно. Тестовий сет містить дані за період від 31.08.2021 до 27.12.2021.

Прогнози побудованих моделей щодо кількості захворювань на коронавірус з використанням лінійної регресії наведено на рис. 2.

Тренувальний сет візуалізований чорною лінією з колами, а прогнозовані значення моделлю - сірою лінією з трикутниками.

Графіки ілюструють високе співпадіння прогнозованих та реальних даних для України (рис.2, а) та слабке для Індії (рис. 2, б).

Розглянемо результати роботи моделі прогнозу побудованої за допомогою алгоритму градієнтного бустингу. Часові ряди кількості випадків захворювань на COVID-19 в Україні та Індії наведені на рис. 3. Тренувальний сет показаний чорною лінією з колами, а прогнозовані значення за допомогою моделі - сірою лінією з трикутниками. З графіків на рис.

3, а для України можна зробити висновок, що данні моделі суттєво відрізняються від фактичних. Натомість для Індії співпадіння даних тестового набору та модельних значень є значно кращим.

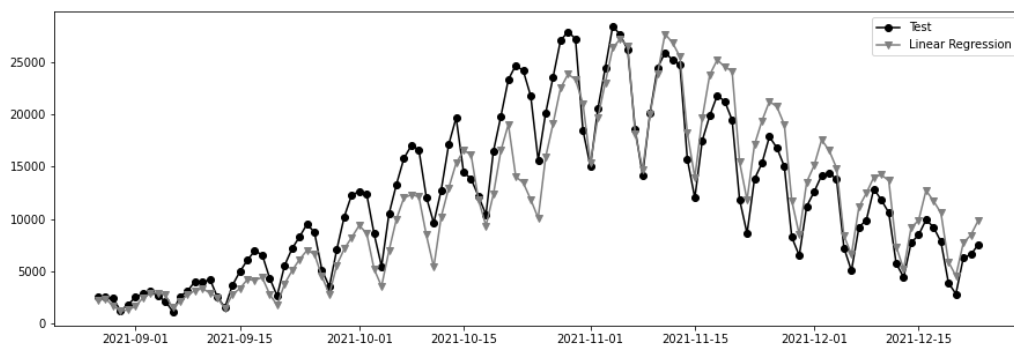
Оцінемо похибки побудованих моделей за допомогою відомих формул для відносних абсолютної та квадратичної похибок відповідно [6] та [7]. Ще одна величина, що дозволяє швидко оцінити якість передбачуваної моделі це точність прогнозу, яку можна розрахувати за формулою:

$$PAC \equiv r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (5)$$

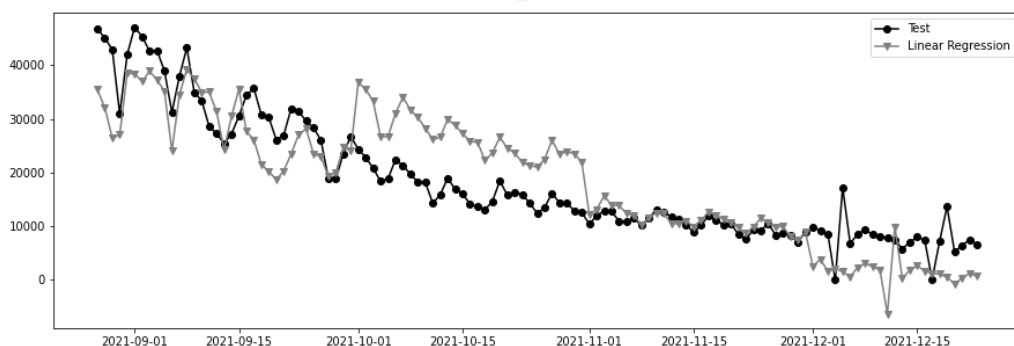
Розраховані величини похибок та точності прогнозів наданих за допомогою методів лінійної регресії та градієнтного бустингу наведені для обох країн в табл. 1. З отриманих даних можна зробити висновок, що для України краще підходить побудована модель з використанням лінійної регресії, а для Індії – градієнтного бустингу.

Таблиця 1 – Метрики оцінки похибки та точності побудованих моделей для передбачення кількості захворювань по дням в Україні та Індії

Країна	Україна		Індія	
Метод	Лінійна регресія	Градієнтний бустинг	Лінійна регресія	Градієнтний бустинг
Відносна абсолютна похибка	0.375505	0.852222	0.625125	0.429781
Відносна квадратична похибка	0.161849	0.887345	0.401214	0.242251
Точність прогнозу	0.838150	0.112655	0.598785	0.757748



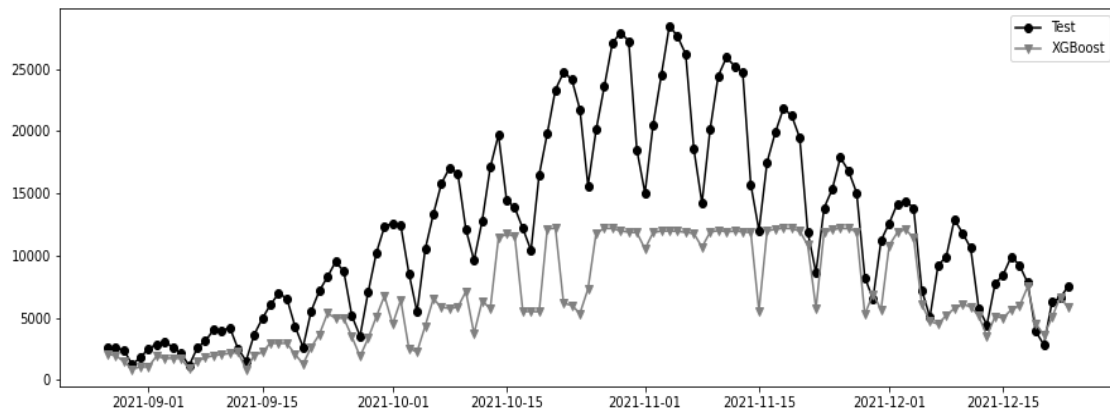
а



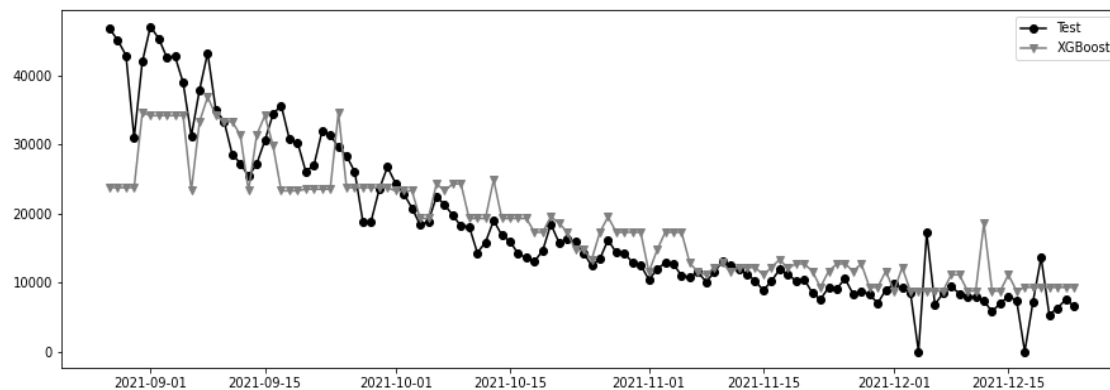
б

Рис. 2. Часовий ряд кількості випадків захворювань на COVID-19 в Україні (а) та Індії (б), отриманий за допомогою моделі, побудованої з використанням методу лінійної регресії

(Fig. 2. A time series of the number of COVID-19 cases in Ukraine (a) and India (b) was obtained using a linear regression model)



а



б

Рис. 3. Часовий ряд кількості випадків захворювань на COVID-19 в Україні (а) та Індії (б), отриманий за допомогою моделі, побудованої з використанням методу градієнтного бустингу
(Fig. 3. A time series of the number of COVID-19 cases in Ukraine (a) and India (b) was obtained using a XGBoost model)

Передбачувані моделі для кількості захворілих по дням в Україні та Індії на проміжок часу з 28 грудня 2021 року до 26квітня 2022 року вказують на те, що в обох країнах невдовзі почнеться спад кількості захворілих та невеликі коливання навколо стабільних значень з часом.

Висновки

Побудовані моделі передбачення кількості захворілих на COVID-19 з використанням методів машинного навчання.

Побудовані моделі навчалися на даних зібраних з початку епідемії для України та Індії.

Для навчання моделей використані алгоритми лінійної регресії та градієнтного бустингу.

Досліджуваний набір даних вміщує кількість захворювань по днях починаючи з 22 січня 2020 року до 2021-12-22 для різних країн. На момент

дослідження даних, набір вміщував дані по кількості захворювань за 702 дні. Визначено характеристики, що враховуються при навчанні моделі: дата початку події, день тижня, номер тижня, місяць та інші.

Проведено аналіз щодо визначення впливу цих параметрів на якість навчання моделі.

Встановлено, що для прогнозування часових рядів з епідеміологічної ситуації в Україні краще підходить алгоритм лінійної регресії, натомість в Індії – градієнтного бустингу.

Оцінені похибки моделей та точність прогнозу з найкращими показниками 83% для України та 75% для Індії.

Побудовані моделі, дозволяють передбачати епідеміологічну ситуацію в майбутньому, координувати дії у різних галузях охорони здоров'я та проводити обґрунтовані превентивні заходи на державному рівні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. (2019), *Coronavirus disease 2019 COVID-19* (wikipedia.org), available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/COVID-19>.
2. (2020), *Artificial Intelligence and Machine Learning Trends in 2020*, available at: <https://www.dataversity.net/artificial-intelligence-and-machine-learning-trends-in-2020/Artificial Intelligence and Machine Learning Trends in 2020 - DATAVERSITY>
3. Kononova, K.Yu. (2020), *Machine learning: methods and models*, V.N. Karazin KhNU Kharkiv, 301 p.
4. Goodfellow, J., Curville, A. and Bengio I. (2018), *Deep Learning*, 654 p.

5. (2021), CSSEGIS and Data/COVID-19, available at: https://raw.githubusercontent.com/CSSEGISandData/COVID-19/master/csse_covid_19_data/csse_covid_19_time_series/time_series_covid19_confirmed_global.csv
6. (2021), GeneXproTools 5.0 – Relative Absolute Error, available at: <https://www.gepsoft.com/GeneXproTools/AnalysesAndComputations/MeasuresOfFit/RelativeAbsoluteError.htm>
7. (2021), GeneXproTools 5.0 – Relative Squared Error, available at: <https://www.gepsoft.com/GeneXproTools/AnalysesAndComputations/MeasuresOfFit/RelativeSquaredError.htm>

Received (Надійшла) 27.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.04.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Хорошун Ганна Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєверодонецьк, Україна;
Ganna Khoroshun – PhD (Optics and Laser Physics), Associated Professor, Associated Professor of Computer Science and Engineering Department, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine;
 e-mail: an_khor@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1272-1222>.

Рязанцев Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєверодонецьк, Україна;
Oleksandr Ryazantsev – Doctor of technical sciences, Professor, Head of Computer Science and Engineering Department, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine;
 e-mail: a_ryazantsev@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3740-3132>.

Коверга Марк Олександрович – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєверодонецьк, Україна;
Mark Koverha – PhD student of Computer Science and Engineering Department, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine;
 e-mail: markkoverga@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9906-4845>.

Покришка Сергій Анатолійович – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєверодонецьк, Україна;
Sergey Pokryshka – PhD student of Computer Science and Engineering Department, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine;
 e-mail: xakermans@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4092-1221>.

Модели машинного обучения для предвидения количества заболевших на COVID-19 в Украине и Индии

Г. Н. Хорошун, А. И. Рязанцев, М. А. Коверга, С. А. Покришка

Аннотация. Построены модели предсказания количества заболевших COVID-19 с использованием методов машинного обучения. Построенные модели обучались на данных, собранных из разных официальных источников, включая Всемирную Организацию Здравоохранения, с начала эпидемии до настоящего времени. Для обучения моделей предсказания количества заболевших COVID-19 выбраны Украина и Индия. Методами, которые придали высокую точность прогноза для существующих данных, оказались алгоритмы линейной регрессии для Украины и градиентного бустинга для Индии. Анализ данных проводился с помощью языка программирования Python, с использованием библиотеки Sklearn, построенной на основе SciPy (Scientific Python). Кроме того, использовалась библиотека алгоритма градиентного бустинга XGboost. Для разработки модели выбрано многофакторное прогнозирование временных рядов с использованием в качестве предикторов запоздания временного ряда. Определены характеристики, влияющие на обучение модели: дата начала события, день недели, номер недели, месяц и другие. Проведен анализ определения влияния этих параметров на качество обучения модели. Оценены ошибки моделей и точность прогноза с лучшими показателями 0.83 для Украины и 0.75 для Индии. Построенные модели позволяют предсказывать эпидемиологическую ситуацию в будущем, координировать действия в различных отраслях здравоохранения и проводить обоснованные превентивные мероприятия на государственном уровне.

Ключевые слова: машинное обучение; модели прогнозирования; метод линейной регрессии; метод градиентного бустинга.

Machine learning models for predicting the number of COVID-19 patients in Ukraine and India

Ganna Khoroshun, Oleksandr Ryazantsev, Mark Koverha, Sergey Pokryshka

Abstract. Models for predicting the number of patients with COVID-19 using machine learning methods have been built. The data for models are obtained from various official sources, including the World Health Organization, from the beginning of the epidemic to the present time. The data in Ukraine and India were selected to teach models for predicting the number of patients with COVID-19. Algorithms of linear regression for Ukraine and gradient boosting for India proved to be the methods that provided high accuracy of the forecast for the existing data. Data analysis was performed using the Python programming language with Sklearn library which is based on SciPy (Scientific Python). In addition, the XGboost gradient boost algorithm library was used. To develop the model, multifactor prediction of time series with the delays as predictors was chosen. It is established that the such characteristics as the date of the event, day of the week, week number, month affect to the model. Model errors are smallest and forecast accuracy were estimated with the best values of 0.83 for Ukraine and 0.75 for India. The built models allow to predict the epidemiological situation in the future, to coordinate actions in different areas of health care and to carry out reasonable preventive measures at the state level.

Keywords: machine learning, prediction models, linear regression method, gradient boosting method.

Mahabbat Khudaverdiyeva

Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

MODELING OF MOBILE ROBOT WITH OBSTACLE AVOIDANCE USING FUZZY CONTROLLER

Abstract. This paper presents the modeling of a robot's navigation using ultrasonic sensors under uncertainty. The robot tries to avoid obstacles by using the fuzzy logic controller to process the data coming from three ultrasonic sensors. To assess the performance of fuzzy logic optimized robot navigation controller with ultrasonic sensors, which measure the distance by calculating the time spent on the object and its return, the obstacles are placed in front of, left, and right of the robot. Mamdani fuzzy reasoning system is used for the designed controller for its intuitive properties and fewer setting parameters which reduces the amount of time spent on the programming of the controller. 25 rules are considered to cover a robot's possible interactions with obstacles. For an easy understanding of navigation architecture and rapid algorithm implementation, in this paper, a MATLAB simulation framework is developed. MATLAB/Simulink is one of the best simulation tools required to design the architecture and verify algorithms with real-time constraints. Resultant models of the fuzzy optimized controller demonstrate the superior performance of the fuzzy logic controller with high adaptability to the environment while maintaining a sufficient level of accuracy. The designed fuzzy controller can be used in microprocessor/microcontroller-based robots owing to easiness in implementation and coding.

Keywords: fuzzy controller; robot navigation; sensor; MATLAB environment.

Introduction

Mobile robot autonomous navigation is a challenging task to implement. The present controllers for mobile robots fail to deliver the desired control performance because of the problems associated with the tuning methods. Fuzzy controllers, on the other hand, are capable of providing the required performance. Therefore, it is necessary to build a navigation architecture that includes modules with well-defined and self-contained operations and design the interactions between those modules.

Analysis of publications. Publication analysis is necessary to assess the significance of the fuzzy controlled robots with obstacle avoidance. A lot of papers have been published on robot controllers for efficient control. Star and Velocity-Obstacle Algorithms are proposed in [1].

A sensor-based control system using a Q-learning algorithm was proposed in [2]. This method utilizes a learning-based controller that learns to create the function between the sensory outputs and the system variables. Q-Learning is the reinforcement learning method selected to solve the obstacle avoidance problem. Reinforcement Learning allows a mobile robot to independently explore an optimal behavior through trial-and-error methods with its outer environment.

Another method for obstruction avoidance for mobile robots was suggested in [3]. In their technique, the robot is capable of navigating through an uncertain environment while passing by obstacles. Simulations were implemented assuming the robot had tactile sensors. Another method for obstacle avoidance Based on Computer Path Planning was suggested in [4] using a rapid and effective algorithm for obstacle avoidance. A multi-sensor integration mechanism for mobile robot navigation is proposed in [5]. A novel method for the arithmetic mean-based decision-making system is described in [6]. Recently, there is a growing interest in fuzzy-controlled mobile robots [7-9].

Dynamic-Window Method (DWM) [10] converts the environmental data in the classical Cartesian coordinate system into linear and angular velocities as references, computes the weighted sum of distances, and avoids the placed obstacles by selecting the objective function's largest value.

The Expanded Guide Circle (EGC) method [11] is an algorithm that adjusts the operator's control input to avoid collisions. Although it is a method intended for boosting the safety of remote operations, there are two issues which are 1) a control input toward obstacles existing under several specific conditions, and 2) a zig-zag action along a hallway. The Dual-EGC algorithm is expanded around these two intersections [12].

Another famous method is obstacle avoidance with a vision which was proposed in [13-18]. LiDAR-based approaches are also used in mobile robots [19-20]. These methods extract spatial data from laser point-cloud with segmentation and clustering approaches.

Although the aforementioned methods are effective for better control performance, the increased complexity of these algorithms makes them unsuitable for microcontroller-based applications.

Purpose and problem statement. The purpose of the work is to model and simulate a fuzzy controller by developing its rule-table, linguistic variables, and input-output variables.

Simulation of a robot's navigation s in a MATLAB environment under uncertainty

Let's look at a simulation of a robot's navigation in a MATLAB environment. Let's determine the relationship between the input and output parameters in the microcontroller built on the fuzzy logic system in these robots. The robot tries to avoid obstacles with fuzzy logic. Obstacles are placed in front of, left, and right of the robot. It measures the distance by calculating the time spent on the object and its return.

There is an output quantity corresponding to this distance. The sum of all outputs is visible at the end,

aggregation is performed. The previous or conditional block of the rule begins with the expression IF, and the result or result block begins with the expression THEN. The value assigned to the resultant block is equal to the logical product of the activation values of the previous membership functions that characterize the boundaries of the fuzzy sets. The activation value is equal to the value of the membership function where the input variable intersects at the time of evaluation.

A diffusion operation is performed to convert fuzzy values represented by logical products and sequential membership functions into a stable and accurate result. De-fusion can be done in several ways.

Most applications perform mass center or fuzzy centroid calculations in a fuzzy set. The distance is left, the distance is forward, the distance is right, and the output speed and the direction of rotation are shown.

In MATLAB we can show the general interface of the fuzzy controller as follows. controller to determine

the speed and rotation angle of the robots by activating corresponding robots.

Fig. 1 illustrates the inputs and outputs of the designed controller. As is seen from the graph the data received from the front, right, and left sensors provide data on the distance from corresponding obstacles. According to these data, the controller calculates the speed and rotation angle of the robot to avoid the obstacle. Fig. 2 depicts input variable (distance_forward) fuzzification which determines the distance between the front sensor and the obstacle in front of the robot. The same procedure is carried out for the other two input variables with the same settings.

The following Fig. 3 is a set of rules for the dependencies between the most common IF-THEN fuzzy sets in software computing technologies. These rules, according to the data coming from ultrasonic sensors, determine the activation of motors for speed and rotation angle control.

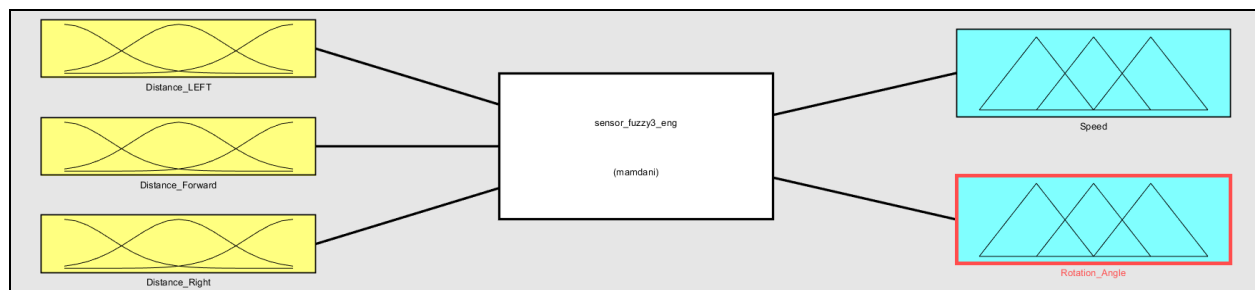


Fig. 1. Fuzzy Logic Toolbox editor

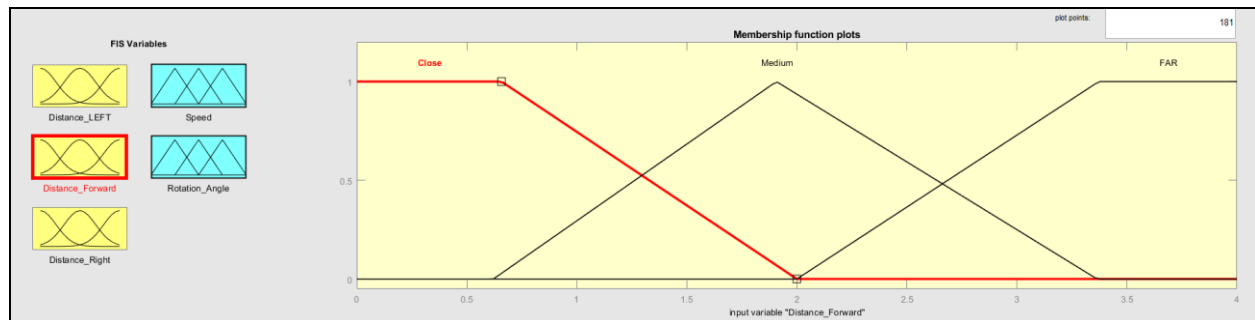


Fig. 2. Introduction Quantification "Distance Forward"

1. If (Distance_LEFT is Close) and (Distance_Forward is Close) and (Distance_Right is Close) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Right) (1)
2. If (Distance_LEFT is Close) and (Distance_Forward is Close) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Right) (1)
3. If (Distance_LEFT is Close) and (Distance_Forward is Medium) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Right) (1)
4. If (Distance_LEFT is Close) and (Distance_Forward is Medium) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Right) (1)
5. If (Distance_LEFT is Close) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is Medium) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Right) (1)
6. If (Distance_LEFT is Close) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Right) (1)
7. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is Close) and (Distance_Right is Close) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
8. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is Close) and (Distance_Right is Medium) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
9. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is Close) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Right) (1)
10. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is Medium) and (Distance_Right is Close) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
11. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is Medium) and (Distance_Right is Medium) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Left) (1)
12. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is Medium) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Right) (1)
13. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is Close) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
14. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is Medium) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Left) (1)
15. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Right) (1)
16. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is Close) and (Distance_Right is Close) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
17. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is Close) and (Distance_Right is Medium) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
18. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is Close) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
19. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is Medium) and (Distance_Right is Close) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
20. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is Medium) and (Distance_Right is Medium) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Left) (1)
21. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is Medium) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Left) (1)
22. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is Close) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Left) (1)
23. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is Medium) then (Speed is Low)(Rotation_Angle is Half-Left) (1)
24. If (Distance_LEFT is Forward) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is FAR) then (Speed is High)(Rotation_Angle is Forward) (1)
25. If (Distance_LEFT is Medium) and (Distance_Forward is FAR) and (Distance_Right is Medium) then (Speed is Medium)(Rotation_Angle is Half-Left) (1)

Fig. 3. Dependencies between fuzzy sets in the most common IF-THEN fuzzy relationships in software computing technologies

25 rules have been constructed for the fuzzy rule table.

Fig. 4 shows the rotation degrees ranging from -90 to +90 degrees, with -90 representing leftmost, -45 for half-left, 0 forward, +45 for half-right, and +90 for rightmost direction in a non-fuzzy/ crisp system.

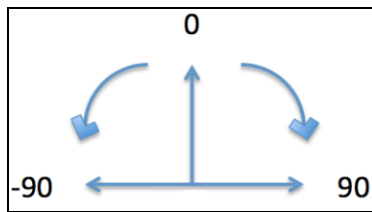


Fig. 4. Rotation angles

Two output variables (speed and rotation angle) are assumed. Their corresponding fuzzification process is described in Fig. 5 and Fig. 6, respectively. Triangle type membership function for each linguistic variable is considered because of its simplicity and easiness in implementation. In Fig. 5 and Table 1, five linguistic variables (Left, Half-Left, Forward, Half-Right, Right) are

assigned for output rotation angles. In Fig. 6 and Table 2, three linguistic variables (Low, Medium, and High) are defined for the output speed of the robot.

Table 1 – Fuzzy Linguistic variables for rotation angles

Linguistic Variable	Rotation degrees
Left	-90 to -87
Half-Left	-90 to 0
Forward	-45 to 45
Half-Right	0 to 90
Right	75 to 90

Table 2 – Fuzzy Linguistic variables for rotation angles

Linguistic Variable	Speed
Low	0 to 0.2 m/s
Medium	0.1 to 0.7 m/s
High	0.6 to 1 m/s

The purpose of the inclusion of output quantity “speed” is to decrease the speed when the distance decreases between the robot and the obstacle to avoid the obstacle.

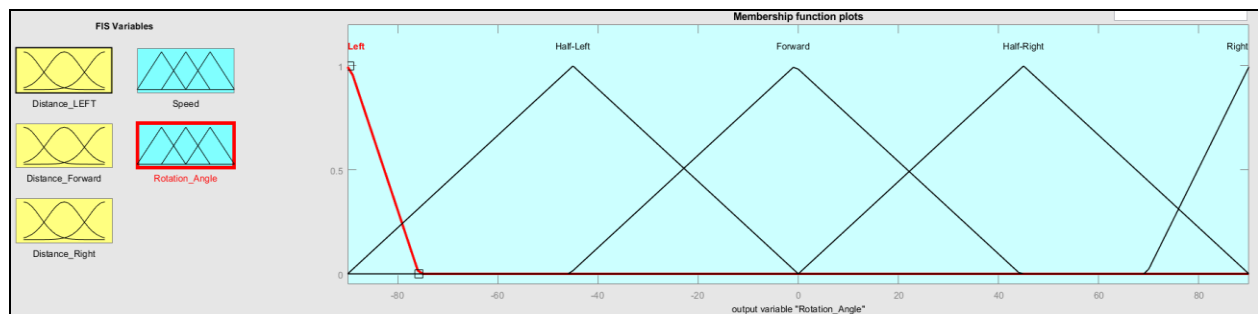


Fig. 5. Output quantity "Rotation angle" classification

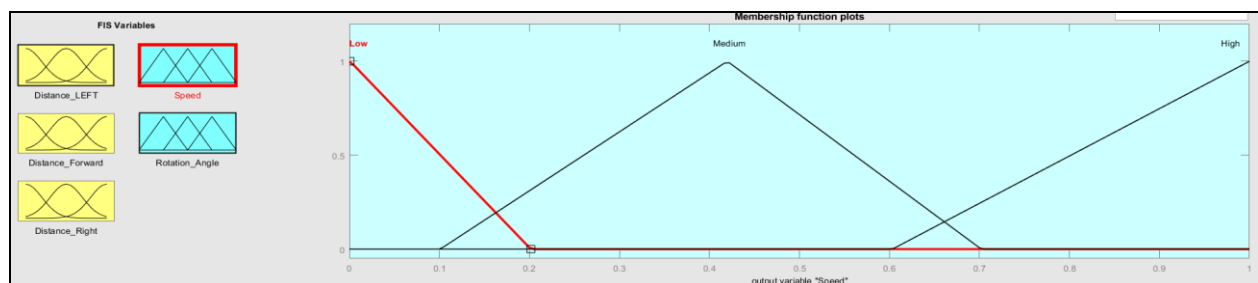


Fig. 6. Output quantity "Speed" classification

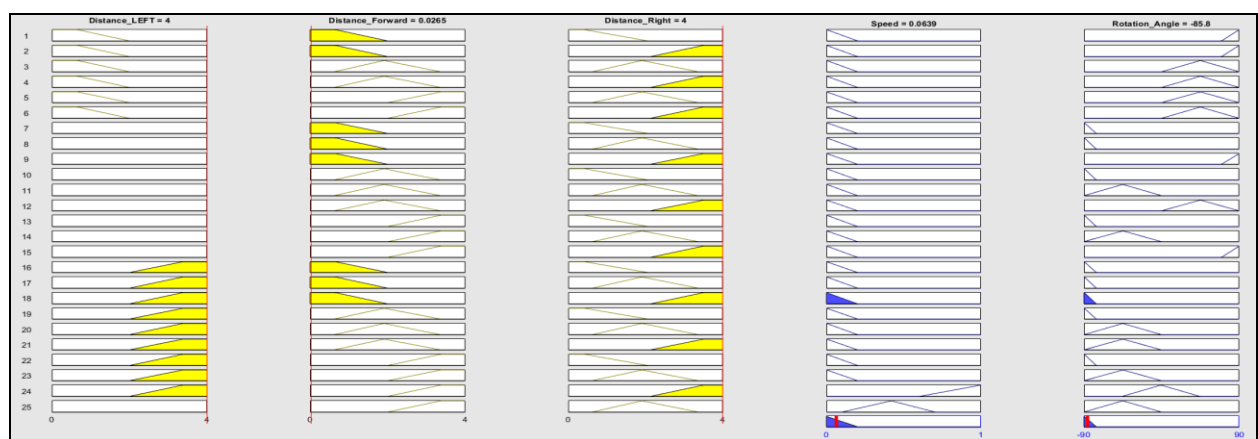


Fig. 7. Activation window for fuzzy rules

Simulation Results

Activation of rules is depicted in Fig. 7, whereas simulation results are shown in Fig. 8.

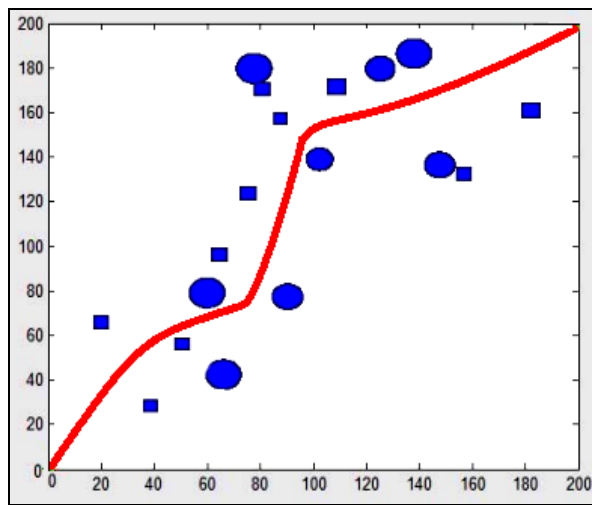


Fig. 8. Obstacle avoidance by a fuzzy robot

As is seen from the result, a robot using a fuzzy controller optimized controller has successfully managed to avoid obstacles placed in various directions.

For example, if the distance between the front and left sensor of the robot and the obstacle is small, while that is far from the right sensor, then the sensor rotates to the right. Furthermore, speed also changes depending on the distance between the obstacle and the sensor. If the distance decreases, then speed must also decrease proportionately for a smooth stop action.

Conclusions

In this paper, the fuzzy control approach has been considered to model the robot with an obstacle avoidance control system based on three ultrasonic wave sensors under unknown situations. In the model, 25 fuzzy rules of three inputs and two outputs are designed for the fuzzy controller with all inputs described by three linguistic variables. Rotation angles are defined with seven states for the movement.

Simulations present that this method can efficiently realize autonomous obstacle avoidance in an unknown environment. A robot can change its speed and rotation angle depending on the position of obstacles.

Furthermore, resultant models of the fuzzy optimized controller demonstrate the superior performance of the fuzzy controller with high adaptability to the environment while maintaining a sufficient level of accuracy.

REFERENCES

- Yan, H., Zhu, Q., Zhang, Y., Li, Z. and Du, X. (2022), "An Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on A Star and Velocity-Obstacle Algorithms", *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, pp. 77-82, DOI: <https://doi.org/10.1109/ITOEC53115.2022.9734642>.
- Ribeiro, T., Gonçalves, F., Garcia, I., Lopes, G. and Ribeiro, A. F. (2019), "Q-Learning for Autonomous Mobile Robot Obstacle Avoidance", *2019 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, pp. 1-7, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICARSC.2019.8733621>.
- Liu, Y., Chen, D. and Zhang, S. (2018), "Obstacle avoidance method based on the movement trend of dynamic obstacles", *2018 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*, pp. 45-50, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCRE.2018.8376431>.
- Nan, J. (2021), "Research on Robot Obstacle Avoidance System Based on Computer Path Planning", *2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA)*, pp. 909-913, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPECA51329.2021.9362699>.
- Cui, W. (2019), "Multi-sensor Information Fusion Obstacle Avoidance based on Fuzzy Control", *2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, pp. 198-202, DOI: <https://doi.org/10.1109/AUTEEE48671.2019.9033349>.
- Arif, M. U. and Marzoughi, A. (2020), "Arithmetic mean-based decision-making algorithm for obstacle avoidance and multiple intruder detection", *2020 Australian and New Zealand Control Conference (ANZCC)*, pp. 103-107, DOI: <https://doi.org/10.1109/ANZCC50923.2020.9318343>.
- Babinski, D., Berisha, J., Zaev, E. and Bajrami, X. (2020), "Application of Fuzzy Logic and PID Controller for Mobile Robot Navigation", *2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/MECO49872.2020.9134317>.
- Allagui, N. Y., Abid, D. B. and Derbel, N. (2019), "Autonomous navigation of mobile robot with combined fractional-order PI and fuzzy logic controllers", *2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp. 78-83, DOI: <https://doi.org/10.1109/SSD.2019.8893176>.
- Waga, A., Laminin, C., Benhlila, S. and Bekri, A. (2021), "Fuzzy logic obstacle avoidance by an NAO robot in an unknown environment", *2021 Fifth International Conference On Intelligent Computing in Data Sciences (ICDS)*, pp. 1-7, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDS53782.2021.9626718>.
- Zhu, Z., Xie, J. and Wang, Z. (2019), "Global Dynamic Path Planning Based on Fusion of A Algorithm and Dynamic Window Approach", *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 5572-5576, DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC48633.2019.8996741>.
- Park, S. H. and Kim, G. W. (2014), "Expanded Guide Circle-based obstacle avoidance for the remotely operated mobile robot", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 1034-1042.
- Kim, D. G. and Kim, G. W. (2016), "Multi-Expanded Guide Circle-based Obstacle Avoidance for the Remotely Operated Mobile Robot", *2016 Conference on Information and Control Systems*, pp. 84-85.
- Lee, D. Y., Lu, Y. F., Kang, T. K., Choi, I. H. and Lim, M. T. (2012), "3D vision-based local obstacle avoidance method for a humanoid robot", *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 473-475.

14. Luo, R. C. and Kuo, C. (2016), "Intelligent Seven-DoF Robot With Dynamic Obstacle Avoidance and 3-D Object Recognition for Industrial Cyber-Physical Systems in Manufacturing Automation", *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1102-1113, May 2016, DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2508598>.
15. Song, K., Chang, Y. and Chen, J. (2019), "3D Vision for Object Grasp and Obstacle Avoidance of a Collaborative Robot", *2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 254-258, DOI: <https://doi.org/10.1109/AIM.2019.8868694>.
16. Wehrmann, D., Hildebrandt, A. -C., Wittmann, R., Sygulla, F., Rixen, D. and Buschmann, T. (2016), "Fast object approximation for real-time 3D obstacle avoidance with biped robots", *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 38-45, DOI: <https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7576740>.
17. Li, Y. and Liu, Y. (2020), "Vision-based Obstacle Avoidance Algorithm for Mobile Robot", *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 1273-1278, DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9326906>.
18. Nagarajan, V. R. and Singh, P. (2021), "Obstacle Detection and Avoidance For Mobile Robots Using Monocular Vision", *2021 8th International Conference on Smart Computing and Communications (ICSCC)*, pp. 275-279, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSCC51209.2021.9528162>.
19. Ghorpade, D., Thakare, A. D. and Doiphode, S. (2017), "Obstacle Detection and Avoidance Algorithm for Autonomous Mobile Robot using 2D LiDAR," *2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*, pp. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCUBEA.2017.8463846>.
20. Padgett, S. T. and Browne, A. F. (2017), "Vector-based robot obstacle avoidance using LIDAR and mecanum drive", *SoutheastCon 2017*, pp. 1-5, DOI: <https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925312>.

Received (Надійшла) 14.02.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.04.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Худавердієва Махаббат – завідувачка навчальної лабораторії, здобувач PhD, кафедра приладобудування, Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан;

Mahabbat Khudaverdiyeva – Head of the teaching laboratory, candidate for PhD, Instrumentation Engineering Department, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan;

e-mail: Khudaverdiyeva62@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5090-4628>.

Моделирование мобильного робота с выбегом перешкод с использованием нечеткого контроллера

М. А. Худавердиева

Анотация. У этой статьи наведено моделирование навигации робота с использованием ультразвуковых датчиков в условиях неопределенности. Робот намагається уникнути перешкод, використовуючи контролер нечіткої логіки для обробки даних, що надходять від трьох ультразвукових датчиків. Для оцінки продуктивності оптимізованого на основі нечіткої логіки навігаційного контролера робота з ультразвуковими датчиками, які вимірюють відстань, обчислюючи час знаходження об'єкта і його повернення, перешкоди розміщують попереду, ліворуч і праворуч від робота. Система нечітких міркувань МАМДАНИ використовується для розробленого контролера через його інтуїтивно зрозумілі властивості і меншу кількість параметрів налаштування, що скорочує час, що витрачається на програмування контролера. Вважається, що 25 правил охоплюють можливу взаємодію робота з перешкодами. Для легкого розуміння архітектури навігації та швидкої реалізації алгоритму у цій статті розроблено середовище моделювання MATLAB. MATLAB/Simulink - один з кращих інструментів моделювання, необхідних для проектування архітектури та перевірки алгоритмів з обмеженнями в реальному часі. Результуючі моделі нечіткого оптимізованого контролера демонструють чудову продуктивність нечіткого логічного контролера з високою адаптованістю до навколишнього середовища при збереженні достатнього рівня точності. Розроблений нечіткий контролер може бути використаний у роботах на базі мікропроцесора/мікроконтролера завдяки простоті реалізації та кодування.

Ключові слова: нечіткий контролер; навігація робота; датчик; середовище MATLAB.

Моделирование мобильного робота с избеганием препятствий с использованием нечеткого контроллера

М. А. Худавердиева

Аннотация. В статье представлено моделирование навигации робота с использованием ультразвуковых датчиков в условиях неопределенности. Робот пытается избежать препятствий, используя контроллер нечеткой логики для обработки данных, поступающих от трех ультразвуковых датчиков. Для оценки производительности оптимизированного на основе нечеткой логики навигационного контроллера робота с ультразвуковыми датчиками, которые измеряют расстояние, вычисляя время нахождения объекта и его возвращения, препятствия размещают впереди, слева и справа от робота. Система нечетких рассуждений МАМДАНИ используется для разработанного контроллера из-за его интуитивно понятных свойств и меньшего количества параметров настройки, что сокращает время, затрачиваемое на программирование контроллера. Считается, что 25 правил охватывают возможные взаимодействия робота с препятствиями. Для легкого понимания архитектуры навигации и быстрой реализации алгоритма в этой статье разработана среда моделирования MATLAB. MATLAB/Simulink — один из лучших инструментов моделирования, необходимых для проектирования архитектуры и проверки алгоритмов с ограничениями в реальном времени. Результирующие модели нечеткого оптимизированного контроллера демонстрируют превосходную производительность нечеткого логического контроллера с высокой адаптируемостью к окружающей среде при сохранении достаточного уровня точности. Разработанный нечеткий контроллер может быть использован в роботах на базе микропроцессора/микроконтроллера благодаря простоте реализации и кодирования.

Ключевые слова: нечеткий контроллер; навигация робота; датчик; среда MATLAB.

Adaptive control methods

UDC 629.76

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.05>Eugene Aleksandrov¹, Tetiana Aleksandrova², Iryna Kostianyk², Yaroslav Morgun²¹ Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine² National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

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

Abstract. The problem of choosing the values of the variable parameters of the digital stabilizer of the cosmic stage of a carrier rocket with a liquid-propellant jet engine and an onboard digital computer in the stabilization loop, which ensures stable movement of the stage along the entire active section of the flight trajectory, is considered. The effect of the stabilizer quantization period on the stability region of a closed-loop stabilization system is considered. It is recommended to choose the intersection of stability regions corresponding to uniformly distributed moments of time along the active section of the stage flight trajectory as acceptable values for the variable parameters of the stabilizer of a non-stationary stabilization object.

Keywords: cosmic stage of carrier rocket, digital stabilizer, variable stabilizer parameters, active section of flight trajectory; region of stability in the space of variable parameters.

Introduction

Problem statement. On December 17, 1956, the Decree of the Council of Ministers (CM) of the USSR "On the creation of an intercontinental ballistic rocket (ICBR) R-16 (8K64)" was issued. The development of the R-16 ICBR was entrusted to OKB-586 (Dnepropetrovsk), headed by Chief Designer M.K. Yangel, who went to the USSR Council of Ministers with a proposal to create an experimental design bureau for rocket control systems in Kharkov, headed by Chief Designer B.M. Konoplev. It was planned to entrust this design bureau, under the general scientific supervision of Academician of the Academy of Sciences of the USSR B.N. Petrov, with the development of a fully autonomous control system for the R-16 rocket. On April 11, 1959, the Decree of the Council of Ministers of the USSR on the organization of the Special Design Bureau No. 692 (Kharkov) was issued. OKB-692 was instructed to take over the functions of the head integrated research and development enterprise for the development of control systems for rockets created in OKB-586.

The first task of OKB-692 was the development of the control system for the R-16 rocket, which was replete with a number of tragic events, the main of which was the unauthorized launch of the second-stage liquid-propellant rocket engine in preparing the rocket for launch on October 24, 1960.

The disaster led to the death of 92 people, including Commander-in-Chief of the USSR Rocket Forces, Chief Marshal of Artillery M. I. Nedelin, Chief Designer of OKB-692 B. M. Konoplev, Deputy Chief Designers of OKB-586 V. A. Kontsevoi and L. A. Berlin. More than 50 people received severe burns, poisoning with toxic fuel components and injuries of varying severity.

By decision of the Government of the USSR, work on the creation of the R-16 rocket was continued subject to a radical revision of the organization of work on the

design, production and development of rocket technology in OKB-586 and OKB-692.

The subsequent several launches of the R-16 rocket ended in accidents due to the loss of stability of the second stage of the rocket. The telemetric data of the second stage flight pattern led to the assumption that the loss of its stability is associated with the influence of fluctuations of the free surfaces of the fuel and oxidizer in the stage fuel tanks on the movement of the rocket body.

The problem of stability of the R-16 rocket was solved by a group of OKB-692 scientists consisting of A. I. Gudimenko, Ya. E. Aizenberg, V. N. Romanenko and V. S. Stoletny with the involvement of scientists NII-88 (Moscow) B. I. Rabinovich and G. N. Mikishev, as well as NII-4 (Moscow) G. S. Narimanov and M. M. Bordyukov. As a result, a school of scientists in the field of dynamics was created in OKB-692, later supplemented by V. V. Sorokobatko, V. A. Bataev, and V. G. Sukhorebry, who developed the theoretical basis for designing systems for stabilizing rocketry objects with cavities filled with fuel and oxidizer [1].

As a result, a mathematical model of perturbed motion was created for the two-stage rocket R-16, which takes into account the fluctuations of the fuel and oxidizer in the tanks of the operating stage, on the basis of which the values of the parameters of the stabilization machine were chosen, ensuring the stability of the rocket throughout the entire flight path [2]. The R-16 rocket as part of the 8K64 rocket complex was put into service in 1961 and, together with the 8K67 and 8K69 complexes, until 1977 formed the basis of the USSR nuclear rocket defense.

The theoretical foundations of mathematical modeling of the perturbed movement of ICBR, developed in the process of creating the R-16 rocket, were used to create all subsequent types of rockets: R-36 and R-36P with analog-type stabilizers, as well as R-36M, R-36M UTTKh and R-36M2 with on-board digital computers in

the stabilization circuit. On the basis of R-36 rockets, as part of the 8K69 rocket complex, cosmic rocket complexes 11K69 (Cyclone-2 and Cyclone-3) were created, and the Cyclone-3 carrier rocket is a three-stage with a third (cosmic) stage C5M. The mathematical model of the angular perturbed motion of the C5M cosmic stage (CS) is given in [3,4] and has the following form in the yaw channel:

$$\begin{aligned}\ddot{\psi}(t) &= a'_{\psi\psi} \dot{\psi}(t) + a''_{\psi\beta_1} \ddot{\beta}_1(t) + \\ &+ a''_{\psi\beta_2} \ddot{\beta}_2(t) + a_{\psi\delta} \delta(t); \\ \ddot{\beta}_1(t) + 2\xi_1\omega_1\dot{\beta}_1(t) + \omega_1^2\beta_1(t) &= a''_{\beta_1\psi} \ddot{\psi}(t); \\ \ddot{\beta}_2(t) + 2\xi_2\omega_2\dot{\beta}_2(t) + \omega_2^2\beta_2(t) &= a''_{\beta_2\psi} \ddot{\psi}(t),\end{aligned}\quad (1)$$

where $\psi(t)$ is the angle of rotation of the longitudinal axis of the stage relative to the plane of the orbit; $\beta_1(t)$, $\beta_2(t)$ are the angles of deviation of the free surface of the fuel and oxidizer, respectively, from the unperturbed position; $\delta(t)$ is the angle of deviation of the axis of the marching liquid-propellant jet engine from the longitudinal axis of the stage in the channel of yaw; $a'_{\psi\psi}$, $a_{\psi\delta}$ are time-varying coefficients characterizing the angular motion of the “solidified” cosmic stage; $a''_{\psi\beta_1}$, $a''_{\psi\beta_2}$ are the coefficients of influence of fluctuations of fuel and oxidizer on the angular motion of the rocket; $a''_{\beta_1\psi}$, $a''_{\beta_2\psi}$ are the coefficients of influence of the angular motion of the stage on fluctuations of the liquid in the fuel and oxidizer tanks; ξ_1 , ξ_2 – damping coefficients of the vibrations of the fuel and oxidizer in the tanks of the stage; ω_1 , ω_2 are the natural frequencies of free vibrations of the fuel and oxidizer in the tanks of the stage.

Further, when presenting the main material of the article, the mathematical model (1) will be used as an example, which is associated with the following considerations [5]:

- At present, the Cyclone-4 cosmic rocket complex with the third cosmic stage and onboard computer in the stabilization loop is being developed;
- CS C5M has a short length, which allows neglecting the vibrations of the body of the CS;
- the shape of the fuel and oxidizer tanks of CS C5M is such that in the mathematical model of perturbed motion (1) it is sufficient to take into account only the first tone of oscillations of the free surfaces of the fuel and oxidizer;
- the flight of the C5M CS, which is the third stage of the Cyclone-3 carrier rocket, takes place in the upper layers of the atmosphere, where random external disturbances are of a stationary nature.

The listed features of C5M CS determine the simplicity of its mathematical model (1) while maintaining the basic dynamic characteristics of a solid body with cavities filled with liquid. The R-16, R-36 and R-36P rockets have analog automatic stabilization devices, the electronic control unit of which implements a proportional-differential stabilization law, which for the angular motion of the yaw channel is written as

$$u_{\psi}(t) = k_{\psi} \tilde{u}_{\psi}(t) + k_{\psi} \tilde{u}_{\omega\psi}(t), \quad (2)$$

where k_{ψ} and k_{ψ} are variable coefficients of the stabilization automaton; $\tilde{u}_{\psi}(t)$ is the output signal of the gyroscopic unit (GU) of the yaw channel of the triaxial gyro-stabilized platform (TGSP); $\tilde{u}_{\omega\psi}(t)$ is the output signal of the gyroscopic angular velocity sensor (GAVS) of the yaw channel.

Neglecting the intrinsic dynamics of the GU and GAVS, the stabilization law (2) generated by the analog stabilization automaton can be written as

$$u_{\psi}(t) = k_{\psi} k_{\Gamma} \psi(t) + k_{\psi} k_{\Delta} \omega_{\psi}(t), \quad (3)$$

where k_{Γ} and k_{Δ} are the gains of the GU and GAVS, respectively

The stability of a closed-loop stabilization system is ensured by an appropriate choice of variable parameters k_{ψ} , k_{ψ} relation (3) using the Nyquist stability criterion, according to which the amplitude-phase-frequency characteristic (APFC) of an open-loop stabilization system should not cover the critical point (-1.0) [2]. Further, for building the APFC of the open-loop stabilization system of the carrier rocket, as well as the stability regions in the planes (k_{ψ}, k_{ψ}) of variable stabilizer parameters (3) at NPO KHARTRON (former OKB-692) and at Yuzhnoye Design Bureau (former OKB-586) began to use the MathCAD application package [6].

In the third-generation rockets R-36M (15A14), R-36M UTTKh (15A18) and R-36M2 (15A18M), the stabilization automaton contains an onboard computer in the stabilization circuit. On November 18, 2021, the space agencies of Ukraine and Canada signed a joint statement on partnership, and on November 19, the laying of the first stone of the launch site of the Ukrainian-Canadian project to create a spaceport on the Atlantic coast of New Scotland for the Cyclone-4M carrier rocket, developed and manufactured by state-owned enterprises of Ukraine KB Yuzhnoye and PO Yuzhny Machine-Building Plant.

Cyclone-4M is a two-stage carrier rocket designed to launch the third (cosmic) stage with a mass of 3700 kg into an orbit with a height of 450 km or a CS with a mass of 3000 kg into an orbit with a height of 1200 km. Stabilization of all three stages is carried out by a digital stabilization automaton with an onboard computer in the control loop. The onboard computer performs high-frequency interference filtering of the output signals of the GU and GAVS after their conversion into lattice functions $\tilde{u}_{\psi}[nT]$ and $\tilde{u}_{\omega\psi}[nT]$ the analog-to-code converter (ACC). Filtering is carried out by implementing on-board computer algorithms for digital recursive Butterworth filters [7] of the second and third orders [8]. In the onboard computer, a stabilization algorithm is also formed in the form

$$u_{\psi}[nT] = k_{\psi} \hat{u}_{\psi}[nT] + k_{\psi} \hat{u}_{\omega\psi}[nT], \quad (4)$$

where $\hat{u}_{\psi}[nT]$ and $\hat{u}_{\omega\psi}[nT]$ are lattice functions corresponding to the output signals of the GU and GAVS and filtered from high-frequency noise by digital recursive Butterworth filters, and

$$\begin{aligned} Z\{\hat{u}_\psi[nT]\} &= W_B(z)Z\{\tilde{u}_\psi[nT]\}; \\ Z\{\hat{u}_{\omega\psi}[nT]\} &= W_B(z)Z\{\tilde{u}_{\omega\psi}[nT]\}, \end{aligned} \quad (5)$$

where $Z\{\cdot\}$ is the Z -transformation of the lattice function $\{\cdot\}$; $W_B(z)$ is the discrete transfer function of the low-frequency Butterworth filter. If the onboard computer implements second-order filters, then their discrete transfer function looks like this:

$$W_B(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}. \quad (6)$$

If the onboard computer implements third-order filters, then their discrete transfer function is written

$$W_B(z) = \frac{a_0(1 + 3z^{-1} + 3z^{-2} + z^{-3})}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}. \quad (7)$$

We will assume that Butterworth filters effectively suppress high-frequency noise, primarily determined by the intrinsic dynamics of the GU and GAVS sensors. Then one can write

$$\hat{u}_\psi[nT] = k_f \psi[nT]; \quad \hat{u}_{\omega\psi}[nT] = k_d \omega_\psi[nT].$$

Stabilization algorithm (4) in this case can be reduced to the form

$$u_\psi[nT] = k_\psi k_f \psi[nT] + k_\psi k_d \omega_\psi[nT]. \quad (8)$$

The control signal in the form of a lattice function (8) is fed to the input of the code-to-analogue converter (CAC), which converts the lattice function into a piecewise constant function in accordance with the algorithm

$$u_\psi(t) = \begin{cases} u_\psi[nT] & \text{при } nT < t \leq (n+1)T; \\ u_\psi[(n+1)T] & \text{при } (n+1)T < t \leq (n+2)T. \end{cases} \quad (9)$$

A closed-loop stabilization system can be represented as a connection with feedback of the continuous part of the system (CPS) and its discrete part (DPS). The perturbed motion of the CPS is described by a system of differential equations (1), and the operation of the DPS is described by relations (4)–(9) in lattice functions, so the direct use of the MathCAD software package to construct the APFC of an open-loop stabilization system and the stability regions of a closed-loop system is difficult.

The purpose of this article is to bring the mathematical model of a closed-loop stabilization system of a carrier rocket with a liquid-propellant rocket jet engine and an on-board computer in the stabilization loop, using the example of the C5M cosmic stage of the Cyclone-3 carrier rocket to a form convenient for solving the problem of parametric synthesis of the system using the MathCAD software package, as well as the study of the influence on the stability of a closed system of stabilizing the oscillations of the fuel and oxidizer in the fuel tanks of the CS and period of quantization of the onboard computer.

Main material

Let us write the system of differential equations (1) in the vector-matrix form

$$A\ddot{X}(t) = B \cdot \dot{X}(t) + C \cdot X(t) + D \cdot \delta(t), \quad (10)$$

where the corresponding vectors and matrices are

$$\begin{aligned} X(t) &= \begin{bmatrix} \psi(t) \\ \beta_1(t) \\ \beta_2(t) \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 1 & -a''_{\psi\beta_1} & -a''_{\psi\beta_2} \\ -a''_{\beta_1\psi} & 1 & 0 \\ -a''_{\beta_2\psi} & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ B &= \begin{bmatrix} a'_{\psi\psi} & 0 & 0 \\ 0 & -2\xi_1\omega_1 & 0 \\ 0 & 0 & -2\xi_2\omega_2 \end{bmatrix}; \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_2^2 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} a_{\psi\delta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

The differential equation (10) can be solved with respect to the vector of highest derivatives

$$\ddot{X}(t) = A^{-1}B \cdot \dot{X}(t) + A^{-1}C \cdot X(t) + A^{-1}D \cdot \delta(t). \quad (11)$$

The matrix A^{-1} is defined by the following formula

$$\begin{aligned} A^{-1} &= \\ &= \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}^T = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

where $\det A = 1 - a''_{\beta_2\psi} a''_{\psi\beta_2} - a''_{\beta_1\psi} a''_{\psi\beta_1}$;

$$A_{11} = 1; A_{12} = a''_{\beta_1\psi}; A_{13} = a''_{\beta_2\psi}; A_{21} = a''_{\psi\beta_1};$$

$$A_{22} = 1 - a''_{\beta_2\psi} a''_{\psi\beta_2}; A_{23} = a''_{\beta_2\psi} a''_{\psi\beta_1};$$

$$A_{31} = a''_{\psi\beta_2}; A_{32} = a''_{\beta_1\psi} a''_{\psi\beta_2}; A_{33} = 1 - a''_{\beta_1\psi} a''_{\psi\beta_1}.$$

Let us introduce into consideration the state vector of the stabilization object

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \\ y_5(t) \\ y_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi(t) \\ \dot{\psi}(t) \\ \beta_1(t) \\ \dot{\beta}_1(t) \\ \beta_2(t) \\ \dot{\beta}_2(t) \end{bmatrix}.$$

As a result, the system of differential equations (11) can be written in the Cauchy normal form

$$\dot{Y}(t) = P \cdot Y(t) + Q \cdot \delta(t), \quad (12)$$

where the matrices P and Q are equal

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{bmatrix}; \quad Q = \begin{bmatrix} 0 \\ q_2 \\ 0 \\ q_4 \\ 0 \\ q_6 \end{bmatrix}.$$

The elements of the matrices P and Q at the same time constitute

$$p_{22} = \frac{A_{11}a'_{\psi\psi}}{\det A}; p_{23} = -\frac{A_{21}\omega_1^2}{\det A}; p_{24} = -\frac{2A_{21}\xi_1\omega_1}{\det A};$$

$$p_{25} = -\frac{A_{31}\omega_2^2}{\det A}; p_{26} = -\frac{2A_{31}\xi_2\omega_2}{\det A};$$

$$p_{42} = \frac{A_{12}a'_{\psi\psi}}{\det A}; p_{43} = -\frac{A_{22}\omega_1^2}{\det A}; p_{44} = -\frac{2A_{22}\xi_1\omega_1}{\det A};$$

$$p_{45} = -\frac{A_{32}\omega_2^2}{\det A}; p_{46} = -\frac{2A_{32}\xi_2\omega_2}{\det A};$$

$$p_{62} = \frac{A_{13}a'_{\psi\psi}}{\det A}; p_{63} = -\frac{A_{23}\omega_1^2}{\det A}; p_{64} = -\frac{2A_{23}\xi_1\omega_1}{\det A};$$

$$p_{65} = -\frac{A_{33}\omega_2^2}{\det A}; p_{66} = -\frac{2A_{33}\xi_2\omega_2}{\det A};$$

$$q_2 = \frac{A_{11}a_{\psi\delta}}{\det A}; q_4 = \frac{A_{12}a_{\psi\delta}}{\det A}; q_6 = \frac{A_{13}a_{\psi\delta}}{\det A}.$$

Neglecting the own dynamics of the cosmic stage executive device, we write the control algorithm (8) in the form

$$\delta[nT] = k_{HO} \{k_{\psi}k_{\Gamma}y_1[nT] + k_{\psi}k_{\Delta}y_2[nT]\}, \quad (13)$$

where k_{HO} is the gain of the executive device.

Let us introduce the notations

$$k_{HO}k_{\psi}k_{\Gamma} = k_1; k_{HO}k_{\psi}k_{\Delta} = k_2.$$

As a result, algorithm (13) takes the following form

$$\delta[nT] = k_1y_1[nT] + k_2y_2[nT].$$

Algorithm (14) will be written in the vector-matrix form

$$\delta[nT] = K \cdot Y[nT], \quad (15)$$

where the matrix of variable stabilizer parameters has the form

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Let us write a vector-matrix difference equation relating the initial state of system (12) with its final state at each quantization period [9]:

$$Y[(n+1)T] = \Phi(T) \cdot Y[nT] + H(T) \cdot \delta[nT], \quad (16)$$

where the matrices $\Phi(T)$ and $H(T)$ are defined by the series

$$\Phi(T) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{P^i T^i}{i!}; H(T) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{P^i T^{i+1}}{(i+1)!} Q. \quad (17)$$

Modern onboard computers of carrier rocket have a fairly short quantization period T , therefore, with a sufficient degree of accuracy, we can put:

$$\Phi = E + P \cdot T; H = Q \cdot T. \quad (18)$$

Let us substitute relation (15) and (18) into the right side of equation (16). As a result, we obtain the difference equation of the perturbed motion of the closed stabilization system

$$Y[(n+1)T] = [E + (P + QK)T] \cdot Y[nT]. \quad (19)$$

The characteristic equation of a closed discrete system (19) is written as

$$M(z) = \det[(P + QK)T + E \cdot (1 - z)] = 0. \quad (20)$$

Substituting the matrices P , Q , K into equation (20) and expanding the determinant (20), we obtain:

$$\begin{aligned} M(z, k_1, k_2) = & (1 - z)^6 + m_1(k_2)(1 - z)^5 + \\ & + m_2(k_1, k_2)(1 - z)^4 + m_3(k_1, k_2)(1 - z)^3 + \\ & + m_4(k_1, k_2)(1 - z)^2 + m_5(k_1, k_2)(1 - z) + m_6(k_1) = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

The coefficients of the characteristic equation (21) are determined by the following relations:

$$\begin{aligned} m_1(k_2) &= m_{11} + m_{12}k_1; \\ m_2(k_1, k_2) &= m_{21} + m_{22}k_2 + m_{23}k_1; \\ m_3(k_1, k_2) &= m_{31} + m_{32}k_2 + m_{33}k_1; \\ m_4(k_1, k_2) &= m_{41} + m_{42}k_2 + m_{43}k_1; \\ m_5(k_1, k_2) &= m_{51} + m_{52}k_2 + m_{53}k_1; \\ m_6(k_1) &= m_{63}k_1, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{and } m_{11} = (p_{22} + p_{44} + p_{66})T; m_{12} = q_2T;$$

$$m_{21} = \begin{pmatrix} p_{44}p_{66} + p_{22}p_{44} + p_{22}p_{66} - p_{26}p_{62} \\ -p_{64}p_{46} - p_{24}p_{42} - p_{65} - p_{43} \end{pmatrix} T^2;$$

$$m_{22} = -[(p_{44} + p_{66})q_2 + p_{24}q_4 + p_{26}q_6 - p_{65} - p_{43}]T^2;$$

$$m_{23} = -q_2T^2;$$

$$\begin{aligned} (14) m_{31} = & (p_{22}p_{44}p_{66} + p_{24}p_{46}p_{62} + p_{26}p_{64}p_{42} - \\ & - p_{44}p_{26}p_{62} - p_{22}p_{64}p_{46} - p_{24}p_{66}p_{42} - \\ & - p_{44}p_{65} - p_{22}p_{65} + p_{62}p_{25} + p_{64}p_{45} - \\ & - p_{22}p_{43} - p_{66}p_{43} + p_{42}p_{23} + p_{63}p_{46})T^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{32} = & (p_{44}p_{66}q_2 + p_{24}p_{46}q_6 + p_{26}p_{64}q_4 - \\ & - p_{44}p_{26}q_6 - p_{64}p_{46}q_2 - p_{24}p_{66}q_4 - \\ & - p_{65}q_2 + p_{25}q_6 + p_{64}p_{45} - p_{43}q_2 + p_{23}q_4)T^3; \end{aligned}$$

$$m_{33} = -[(p_{44} + p_{66})q_2 - p_{26}q_6 - p_{24}q_4]T^3;$$

$$\begin{aligned} m_{41} = & -(p_{22}p_{44}p_{65} + p_{24}p_{45}p_{62} + p_{25}p_{64}p_{42} - \\ & - p_{44}p_{25}p_{62} - p_{22}p_{64}p_{45} - \\ & - p_{24}p_{65}p_{42} + p_{22}p_{43}p_{66} + p_{23}p_{46}p_{62} + \\ & + p_{26}p_{63}p_{42} - p_{43}p_{26}p_{62} - \\ & - p_{42}p_{66}p_{23} - p_{22}p_{63}p_{46} - p_{43}p_{65} + p_{63}p_{45})T^4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{42} = & -(p_{44}p_{65}q_2 + p_{24}p_{45}q_6 + p_{25}p_{64}q_4 - \\ & - p_{44}p_{25}q_6 - p_{64}p_{45}q_2 - p_{24}p_{65}q_4 + \\ & + p_{43}p_{66}q_2 + p_{23}p_{46}q_6 + p_{63}p_{26}q_4 - \\ & - p_{43}p_{26}q_6 - p_{66}p_{23}q_4 - p_{63}p_{46}q_2)T^4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{43} = & -(p_{44}p_{66}q_2 + p_{24}p_{46}q_6 + p_{26}p_{64}q_4 - \\ & - p_{44}p_{26}q_6 - p_{24}p_{66}q_4 - p_{64}p_{46}q_2 - \\ & - p_{65}q_2 + p_{25}q_6 - p_{43}q_2 + p_{23}q_4)T^4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_{51} &= (p_{22}p_{43}p_{65} + p_{23}p_{45}p_{62} + p_{25}p_{63}p_{42} - \\
&- p_{43}p_{25}p_{62} - p_{42}p_{23}p_{65} - p_{22}p_{63}p_{45})T^5; \\
m_{52} &= (p_{43}p_{65}q_2 + p_{23}p_{45}q_6 + p_{25}p_{63}q_4 - \\
&- p_{43}p_{25}q_6 - p_{23}p_{65}q_4 - p_{63}p_{45}q_2)T^5; \\
m_{53} &= (p_{44}p_{65}q_2 + p_{24}p_{45}q_6 + p_{25}p_{64}q_4 - \\
&- p_{44}p_{25}q_6 - p_{64}p_{45}q_2 - p_{24}p_{65}q_4 + \\
&+ p_{43}p_{66}q_2 + p_{23}p_{46}q_6 + p_{63}p_{26}q_4 - \\
&- p_{43}p_{26}q_6 - p_{63}p_{46}q_2 - p_{66}p_{23}q_4)T^5; \\
m_{63} &= -(p_{43}p_{65}q_2 + p_{23}p_{45}q_6 + p_{25}p_{63}q_4 - \\
&- p_{43}p_{25}q_6 - p_{23}p_{65}q_4 - p_{63}p_{45}q_2)T^6.
\end{aligned}$$

In the characteristic equation (21), we will make the replacement

$$z = \frac{1+w}{1-w} \quad (23)$$

and write a new characteristic equation with respect to a new complex variable w associated with the complex variable z by a bilinear W - transformation (23):

$$\begin{aligned}
&\left(64 + 32m_1(k_2) + 16m_2(k_1, k_2) + 8m_3(k_1, k_2) + \right. \\
&\left. + 4m_4(k_1, k_2) + 2m_5(k_1, k_2) + m_6(k_1) \right)w^6 - \\
&- \left(32m_1(k_2) + 32m_2(k_1, k_2) + 24m_3(k_1, k_2) + \right. \\
&\left. + 16m_4(k_1, k_2) + 10m_5(k_1, k_2) + 6m_6(k_1) \right)w^5 + \\
&+ \left(16m_2(k_1, k_2) + 24m_3(k_1, k_2) + 24m_4(k_1, k_2) + \right. \\
&\left. + 20m_5(k_1, k_2) + 15m_6(k_1) \right)w^4 - \\
&- \left(8m_3(k_1, k_2) + 16m_4(k_1, k_2) + \right. \\
&\left. + 20m_5(k_1, k_2) + 20m_6(k_1) \right)w^3 + \\
&+ (4m_4(k_1, k_2) + 10m_5(k_1, k_2) + 15m_6(k_1))w^2 - \\
&- (2m_5(k_1, k_2) + 6m_6(k_1))w + m_6(k_1) = 0.
\end{aligned} \quad (24)$$

It is known [10] that a closed discrete stabilization system is stable if all roots of its characteristic equation (20) in the complex plane Z are located inside a circle of unit radius. Bilinear transformation (23) conformally maps a circle of unit radius of the complex plane Z into the imaginary axis of the complex plane W , and a closed discrete stabilization system is stable if all roots of its characteristic equation

$$M\left(\frac{1+w}{1-w}, k_1, k_2\right) = 0. \quad (25)$$

in the complex plane W are to the left of the imaginary axis. Thus, to study the stability of a closed discrete system with a transformed characteristic equation (25), the stability criteria for continuous systems can be used.

In the characteristic equation (24), we will make the replacement $w = j\omega$, select the real and imaginary parts, and set them equal to zero

$$\begin{aligned}
R_1(\omega, T)k_1 + R_2(\omega, T)k_2 &= R_3(\omega, T); \\
R_4(\omega, T)k_1 + R_5(\omega, T)k_2 &= R_6(\omega, T),
\end{aligned} \quad (26)$$

where

$$\begin{aligned}
R_1(\omega, T) &= -(16m_{23} + 8m_{33} + 4m_{43} + 2m_{53} + m_{63})\omega^6 + \\
&+ (16m_{23} + 24m_{33} + 24m_{43} + 20m_{53} + 15m_{63})\omega^4 - \\
&- (4m_{43} + 10m_{53} + 15m_{63})\omega^2 + m_{63};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_2(\omega, T) &= -(32m_{12} + 16m_{22} + 8m_{32} + 4m_{42} + 2m_{52})\omega^6 + \\
&+ (16m_{22} + 24m_{32} + 24m_{42} + 20m_{52})\omega^4 - \\
&- (4m_{42} + 10m_{52})\omega^2;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_3(\omega, T) &= \left(64 + 32m_{11} + 16m_{21} + \right. \\
&\left. + 8m_{31} + 4m_{41} + 2m_{51} \right)\omega^6 - \\
&- (16m_{21} + 24m_{31} + 24m_{41} + 20m_{51})\omega^4 + \\
&+ (4m_{41} + 10m_{51})\omega^2;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_4(\omega, T) &= -\left(32m_{23} + 24m_{33} + 16m_{43} + \right. \\
&\left. + 10m_{53} + 6m_{63} \right)\omega^4 + \\
&+ (8m_{33} + 16m_{43} + 20m_{53} + 20m_{63})\omega^2 - (2m_{52} + 6m_{63});
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_5(\omega, T) &= -\left(32m_{12} + 32m_{22} + 24m_{32} + \right. \\
&\left. + 16m_{42} + 10m_{52} \right)\omega^4 + \\
&+ (8m_{32} + 16m_{42} + 20m_{52})\omega^2 - 2m_{53};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_6(\omega, T) &= (32m_{11} + 32m_{21} + 24m_{31} + 16m_{41} + 10m_{51})\omega^4 - \\
&- (8m_{31} + 16m_{41} + 20m_{51})\omega^2 + 2m_{51}.
\end{aligned}$$

Let us write down the solutions of the system of algebraic equations (26) using the Cramer rule

$$k_1(\omega, T) = \frac{\Delta_1(\omega, T)}{\Delta(\omega, T)}; \quad k_2(\omega, T) = \frac{\Delta_2(\omega, T)}{\Delta(\omega, T)}, \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
\Delta(\omega, T) &= \begin{vmatrix} R_1(\omega, T) & R_2(\omega, T) \\ R_4(\omega, T) & R_5(\omega, T) \end{vmatrix} = \\
&= R_1(\omega, T)R_5(\omega, T) - R_4(\omega, T)R_2(\omega, T);
\end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned}
\Delta_1(\omega, T) &= \begin{vmatrix} R_3(\omega, T) & R_2(\omega, T) \\ R_6(\omega, T) & R_5(\omega, T) \end{vmatrix} = \\
&= R_3(\omega, T)R_5(\omega, T) - R_6(\omega, T)R_2(\omega, T);
\end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
\Delta_2(\omega, T) &= \begin{vmatrix} R_1(\omega, T) & R_3(\omega, T) \\ R_4(\omega, T) & R_6(\omega, T) \end{vmatrix} = \\
&= R_1(\omega, T)R_6(\omega, T) - R_4(\omega, T)R_3(\omega, T).
\end{aligned} \quad (30)$$

Calculation results and conclusions

The values of the coefficients of the mathematical model (1) change over time. Their values for different values of the moments of time of the active part of the flight trajectory of the C5M cosmic stage are given in Table 1 [5]. For the indicated times, we calculate **det A**; A_{11} ; A_{12} ; A_{13} ; A_{21} ; A_{22} ; A_{23} ; A_{31} ; A_{32} and A_{33} , and then the elements of the matrices P and Q of the differential equation (12). The next stage of calculations is the calculation of quantities m_{11} ; m_{12} ; m_{21} ; m_{22} ; m_{23} ; m_{31} ; m_{32} ; m_{33} ; m_{41} ; m_{42} ; m_{43} ; m_{51} ; m_{52} ; m_{53} and m_{63} , and then functions $R_1(\omega, T)$; $R_2(\omega, T)$; $R_3(\omega, T)$;

$R_4(\omega, T)$; $R_5(\omega, T)$ and $R_6(\omega, T)$. And, finally, the last stage of calculations is the construction of the stability regions of the closed stabilization system using relations

(27) when ω changes from zero to infinity and for different values of the quantization period T for different moments of the current time t .

Table 1 – Values of the coefficients of the model (1)

t, s	$a'_{\psi\psi}, s^{-1}$	$a_{\psi\delta}, s^{-2}$	$a''_{\psi\beta_1}$	$a''_{\psi\beta_2}$	$a''_{\beta_1\psi}$	$a''_{\beta_2\psi}$	ω_1^2, s^{-2}	ω_2^2, s^{-2}	$2\xi_1\omega_1$	$2\xi_2\omega_2$
0	-0,0119	-0,643	0,054	-0,046	0	0	14,8	14,2	0,172	0,468
36	-0,0116	-0,643	0,093	0,001	0,477	0,082	14,7	12,1	0,255	0,319
72	-0,0124	-0,721	0,107	-0,024	0,297	-0,813	15,4	31,6	0,359	0,690
108	-0,0084	-0,487	0,413	0,156	0,764	0,296	8,2	9,02	0,357	0,397

On Fig. 1 shows the stability regions of the closed-loop stabilization system corresponding to 36 second of flight of the C5M cosmic stage for various values of the quantization period of the onboard digital computer: curve 1 corresponds to $T = 0,005 s$; curve 2 – $T = 0,01 s$; curve 3 – $T = 0,02 s$. An analysis of the constructed curves indicates that an increase in the quantization period of the onboard digital computer leads to a decrease in the stability region of a closed discrete system.

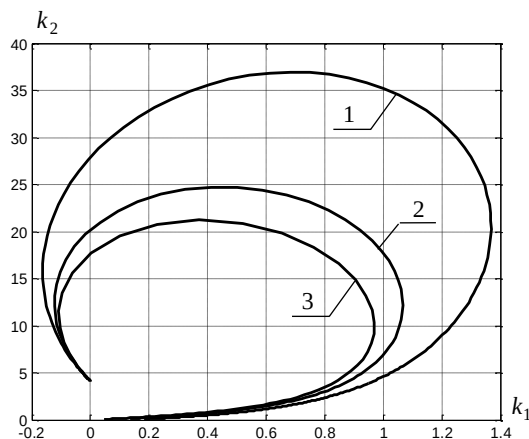


Fig. 1. Stability region of the closed stabilization system at $t = 36 s$: 1 – $T = 0,005 s$; 2 – $T = 0,01 s$; 3 – $T = 0,02 s$

On Fig. 2 shows the stability regions of the C5M CS closed-loop stabilization system corresponding to different moments of the active section of the flight trajectory:

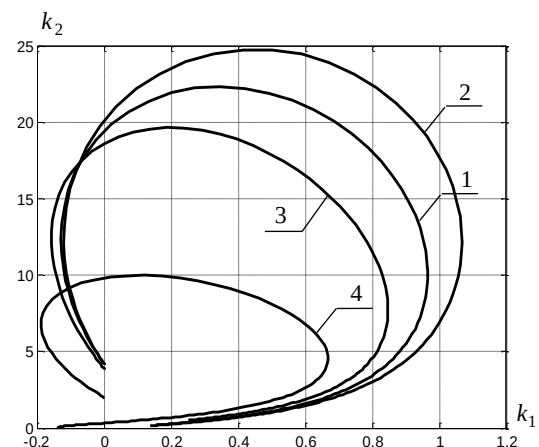


Fig. 2. Stability region of the closed stabilization system at $T = 0,01 s$: 1 – $t = 0 s$; 2 – $t = 36 s$; 3 – $t = 72 s$; 4 – $t = 108 s$

curve 1 corresponds to the moment $t = 0 s$; curve 2 – $t = 36 s$; curve 3 – $t = 72 s$; curve 4 – $t = 108 s$.

The quantization period of the onboard digital computer for all four options is the same and equal to $T = 0,01 s$. An analysis of the constructed curves leads to the conclusion that the stable motion of the cosmic stage along the entire active flight trajectory ensures the choice of the values of the variable parameters of the stabilizer k_1 and k_2 within the region of their allowable values, which is the intersection of the stability regions constructed for individual points of the active part of the flight trajectory.

REFERENCES

1. Ayzenberg, Ya.Ye. (2010), *Rakety. Zhyzn. Sudba*. [Rockets. A life. Fate.], Investor, Kharkiv, 159 p. (in Russian).
2. Ayzenberg, Ya.Ye. and Borushko, Yu. M. (1984), *Dinamicheskie svoystva letatel'noho apparata s ZhRD i trebovaniia k avtomatu stabilizatsyi*. [Dynamic properties of an aircraft with liquid-propellant rocket engines and requirements for a stabilization machine.], KhAI, Kharkiv, 97 p. (in Russian).
3. Aleksandrov, Ye.Ye. and Aleksandrova, T.Ye. (2020), "Parametricheskiiy sintez tsifrovoho stabilizatora kosmicheskoy stupeni rakety-nositelia s ZhRD na aktivnom uchastke traektorii poliota" [Parametric synthesis of the digital stabilizer of the space stage of a carrier rocket with a liquid-propellant rocket engine in the active part of the flight trajectory], *Problemy upravleniya i informatiki*, No. 3, pp. 1–13 (in Russian).
4. Aleksandrov, Ye.Ye., Aleksandrova, T.Ye. and Ovcharenko, Yu.Ye. (2019), *Pidvyshchennia tekhnichnykh ta eronomichnykh kharakterystyk ob'ektiv viiskovoho pryznachennia* [Improvement of technical and ergonomic characteristics of military objects], KhNADU, Kharkiv, 175 p. (in Ukrainian).
5. Igdalov, I.M., Kuchma, L.D., Polyakov, N.V. and Sheptun, Yu.D. (2004), *Raketa kak ob'ekt upravleniya* [Rocket as a control object], ART-PRESS, Dnepropetrovsk, 544 p. (in Russian).

6. 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).
7. Aleksandrova, T.Ye., Aleksandrova, I.Ye. and Lazarenko, A.A. (2014), "Tsifrovyye filtry v sistemah avtomobilnoy avtomatiki" [Digital filters in automotive automation systems], *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, No. 1(37), pp. 25–28 (in Russian).
8. Aleksandrova, T.Ye., Kononenko, V.A. and Lazarenko, A.A. (2011), "Srovnitelnyy analiz PD-stabilizatorov podviznykh ob'ektov s nizkочастотными фильтрами Баттерворта и Ланцоса" [Comparative analysis of PD-stabilizers for moving objects with low-frequency Butterworth and Lanczos filters], *Radioelektronika. Informatyka. Upravlinnia*, No. 2, pp. 148–152 (in Russian).
9. 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).
10. Tu, Yu. (1964), *Tsifrovyye i impulsnyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Digital and pulse automatic control systems], Mashinostroenie, Moscow, 703 p. (in Russian).

Надійшла (received) 16.02.2022

Прийнята до друку (accepted for publication) 27.04.2022

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>

Про стійкість руху, що стабілізується, ракети-носія з рідинним реактивним двигуном і бортовою цифровою обчислювальною машиною в контурі стабілізації

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

Анотація. Розглядається задача вибору значень варіюваних параметрів цифрового стабілізатора космічного ступеня ракети-носія з рідинним реактивним двигуном (РРД) і бортовою цифровою обчислювальною машиною в контурі стабілізації, що забезпечує стійкий рух ступеня уздовж усієї активної ділянки траєкторії польоту. Розглянуто вплив величини періоду квантування стабілізатора на область стійкості замкненої системи стабілізації. У якості області допустимих значень варіюваних параметрів стабілізатора нестационарного об'єкта стабілізації рекомендується обирати перетин областей стійкості, що відповідають рівномірно розподіленим моментам часу уздовж активної ділянки траєкторії польоту ступеня.

Ключові слова: космічний ступінь ракети-носія, цифровий стабілізатор, варіювані параметри стабілізатора, активна ділянка траєкторії польоту; область стійкості в просторі варіюваних параметрів.

Об устойчивости стабилизируемого движения ракеты-носителя с жидкостным реактивным двигателем и бортовой цифровой вычислительной машиной в контуре стабилизации

Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, Я. Ю. Моргун

Аннотация. Рассматривается задача выбора значений варьируемых параметров цифрового стабилизатора космического ступени ракеты-носителя с жидкостным реактивным двигателем (ЖРД) и бортовой цифровой вычислительной машиной в контуре стабилизации, обеспечивающего устойчивое движение ступени вдоль всего активного участка траектории полета. Рассмотрено влияние величины периода квантования стабилизатора на область устойчивости замкнутой системы стабилизации. В качестве допустимых значений варьируемых параметров стабилизатора нестационарного объекта стабилизации рекомендуется выбирать пересечение областей устойчивости, соответствующих равномерно распределенным моментам времени вдоль активного участка траектории полета ступени.

Ключевые слова: космическая ступень ракеты-носителя, цифровой стабилизатор, варьируемые параметры стабилизатора, активный участок траектории полета; область устойчивости в пространстве варьируемых параметров.

Methods of information systems synthesis

UDC 502.5/8

DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.06>Lala Bekirova¹, Esmira Mammadova², Elvira Bunyatova¹¹ Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan² Institute of Space Researches of Natural Resources of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

DEVELOPMENT OF THE METHODS FOR CALCULATING THE MAIN INDICATORS OF HEAT ISLANDS IN URBAN AREAS

Abstract. The article is dedicated to the methods developed to calculate the main parameters of "heat islands" that appear in densely built-up urban area. Although remote sensing imaging is ideally used to track and detect frequent land cover changes in urban and surrounding areas as a result of sustainable urbanization and to calculate key parameters of "heat islands" seen in densely populated urban areas, satellite imagery is digitally manually. The transformation of a parametric image into a land cover map using existing methods of classification is a long process, and therefore methods are proposed to determine the main indicators of the impact of "heat islands" in urban areas. A modified building density index has been formulated, which is highly informative, involving: (a) the proposed index reaches an extremum when the known building density index BDI and NDVI are equalized, (b) when the specified maximum is reached, it is easy to calculate the LST indicator using the known regression dependences of BDI and NDVI from LST. The method has been developed to calculate the area of "heat islands" on the base of the equivalent radius calculation using the known dependence function of the building density on the distance to the center of the urban area. Our study shows that the distribution of buildings and the slope of the relief affect the surface temperature (LST), in addition, the ratios of different LSTs vary in cities of different sizes, and each city has a temperature difference in LSTs, so the urban heating island. To reduce the impact, it is important to identify the characteristics of the thermal environment in cities of different sizes. Urban greening is increasingly valued by cities around the world as an effective measure to reduce the negative effects of the urban heating islands, with different numbers and types of landscape dimensions, different statistical methods used in different surveys, as well as metric scale dependence and contextual differences between cities and we can overcome these challenges by conducting comparative research on time and space using a consistent methodology.

Keywords: heat islands; urban area; surface temperature; informativeness; method.

Introduction

As the results of numerous studies show, "heat islands", i.e., areas with higher temperatures appear not only in the cities of developed countries but also in developing countries. The main reasons for the change in the temperature of the earth's surface in urban areas are the lack of vegetation, thermal and physical properties of construction materials, the presence of buildings, uneven surfaces, and the presence of anthropogenic heat sources. All these factors lead to a change in local energy and an increase in atmospheric temperature in densely built-up areas of cities [1-5].

Over the years, land use and land cover changes have different environmental impacts, and urbanization, i.e., the conversion of natural surfaces into the population and economic growth uses, has a major impact on the urban climate, and area measurements and numerical simulations show that changes in surface features and vegetation occur in urban areas has a significant impact on local climate change near the surface [10].

Land cover in urban areas tends to change more rapidly in a short period of time than elsewhere due to sustainable urbanization, and urbanization, especially in urban and suburban areas, causes frequent changes in land cover as a result of rapid economic development. are found because they are relatively modern and give a panoramic view [8].

Dry surface temperature (LST) measured from satellite imagery has been used to study local and global climate models, urban islands, and the use of remote sensing in groundwater or surface temperature studies

has increased because it provides a synoptic and wide view of an area. Numerous studies have been conducted using LST and NDVI to determine the relationship between urban surfaces and heating temperature from images [9].

Analysis of publications. According to the work [1-6], a fairly strong correlation between surface temperature (LST) was revealed and building density in urban areas, where the correlation coefficient reached 0,61. As mentioned in [7], such thermal anomalies in urban areas, together with the general trend of climate change towards warming, lead to the effect of global warming in cities, which negatively affects the health and working capacity of the urban population, increases mortality, and shortens life expectancy. According to the estimates presented in [7], during 1983-2016s, globally, the thermal impact on the urban population increased by almost 200%, at the same time, the growth rate of such impacts outpaced the increase in the urban population by 52%. The above-mentioned issue emphasizes the importance and relevance of the development of new methods and techniques to assess the physical and spatial indicators of the "heat islands" effect. Furthermore, the article illustrates the proposed methods for determining the main physical and geometric indicators of urban areas with higher temperatures.

Research results

In order to assess the rate of "heat islands" effect, there are various spectral indices, the main of which are the following building density indices: the normalized building density index of *NBDI*, defined as:

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \quad (1)$$

As it is seen from (1), the normalized building density index is defined as the difference between surface reflectance in the mid-infrared (*MIR*) and near-infrared (*NIR*) areas. *NDBI* was first proposed in [8] and is a dimensionless estimate of building density in the area where high values of this index indicate a high degree of building.

Building density index *BDI* is defined as [9]:

$$BDI = NDBI - NDVI, \quad (2)$$

where *NDV* - the normalized difference vegetation index is defined as

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}. \quad (3)$$

As it is seen from expressions (1), (3), near infrared reflection (*NIR*) not only increases the value of *NDVI*, but also reduces the value of *NDBI*. As a result, the *BDI* index is significantly reduced due to the presence of vegetation fields in the study area. In order to correct this situation, it is reasonable to introduce a new, modified building density index (*MBDI*) defined as:

$$MBDI = (BDI)^{\alpha_1} \cdot (NDVI)^{1-\alpha_1}. \quad (4)$$

where α_1 is weighting factor.

Consider a special case, when $\alpha_1 = 0,5$. In this case, from (4) we obtain

$$MBDI^2 = BDI \cdot NDVI. \quad (5)$$

Taking into account (2) and (5), we obtain

$$MBDI^2 = NDBI \cdot NDVI - NDVI^2. \quad (6)$$

Investigating *MBDI*² on an extremum, we obtain

$$\frac{d(MBDI^2)}{d(NDVI)} = NDBI - 2NDVI. \quad (7)$$

From expression (7) we find the maximum condition of *MBDI*:

$$NDVI = \frac{NDBI}{2}. \quad (8)$$

From expression (2) we find

$$NDBI = BDI + NDVI. \quad (9)$$

From expressions (8) and (9) we find

$$NDVI = BDI. \quad (10)$$

Thus, the newly introduced *MBDI* index under condition (10) reaches a maximum, which prevents the effect of excessive reduction due to an increase in *NIR*, as observed in the *BDI* index. In addition, the presence of such a maximum, with the presence of regression dependences $NDVI = f(LST)$ и $BDI = \varphi(LST)$, where *LS* is the temperature on the earth surface, allows us to determine the value of *LST* (Fig. 1). Let us show this by the example of the results of experimental studies provided in [9]. The corresponding regression equations have the following form:

$$NDVI = 0,94 - 0,03LST; \quad (11)$$

$$BDI = -1,5 + 0,06LST. \quad (12)$$

Taking into account (10), (11), (12) we can write

$$-1,5 + 0,06LST = 0,94 - 0,03LST. \quad (13)$$

From (13) we find

$$0,09LST = 2.444; \quad LST \approx 27^\circ\text{C}. \quad (14)$$

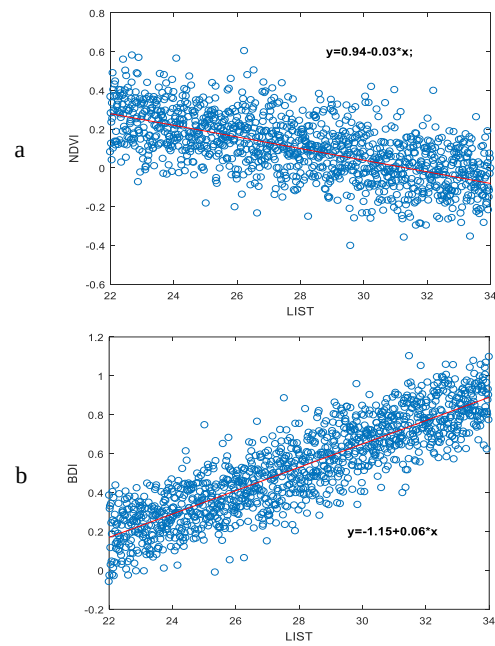


Fig. 1. Regression lines of dependence *NDVI* (a) and *BDI* (b) from *LST*

Tus, the main property of the newly proposed modified building index development is that (a) this index reaches a maximum when condition (10) is reached; (b) condition (10) is reached at a certain value of *LST*, determined by the regression lines of $NDVI = f(LST)$ and $BDI = \varphi(LST)$. These features emphasize the high informativeness of the newly introduced *MBDI* index.

Another important indicator of urban “heat islands” is the geometric site of such areas with higher temperature. According to [10], the spatial change in the density of urban land use can be expressed as a function depending on the distance to the city center as a modified sigmoid function:

$$f(r) = \frac{1-c}{1+\exp\left[\alpha\left(\frac{2r}{D}-1\right)\right]} + c, \quad (15)$$

where *f* is an urban density development; *r* is the distance from city center; *c* is a constant as an asymptote; *f* determines the density of buildings on the outskirts; *D* is a constant characterizing the degree of city expansion.

Note that for compiling temperature maps, such a concept as normalized surface temperature, i.e., LST_n is often used, defined as

$$LST_n = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}}, \quad (16)$$

where *LST* is current temperature; LST_{max} , LST_{min} is respectively, the maximum and minimum temperature values in the area. The results of the analysis of the regression relationship between LST_n and indicators of $f(r)$, carried out according to the method of concentric rings, the center of which coincides with the center of the urban area (Fig. 2), are presented in [10]. Along the perimeter of each of the rings, indicators of $f(r)$ and LST_n and regression functions were calculated.

$$LST_n = LST_n(f_r). \quad (17)$$

A pair of such regression curves, calculated from the data obtained during a day and night, is shown in Fig. 3.

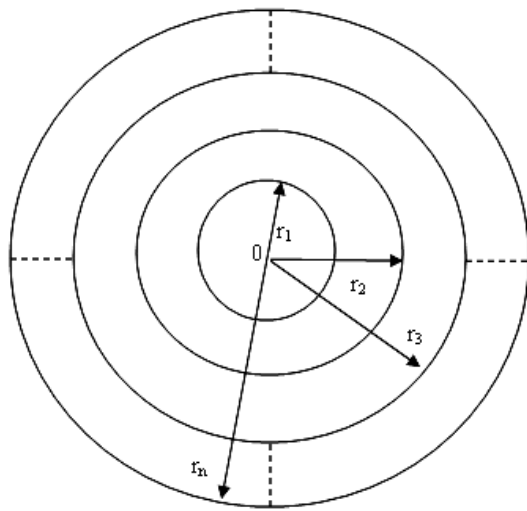


Fig. 2. Figure explaining the method for calculating the regression curve of $LST_n = LST_n(f_r)$

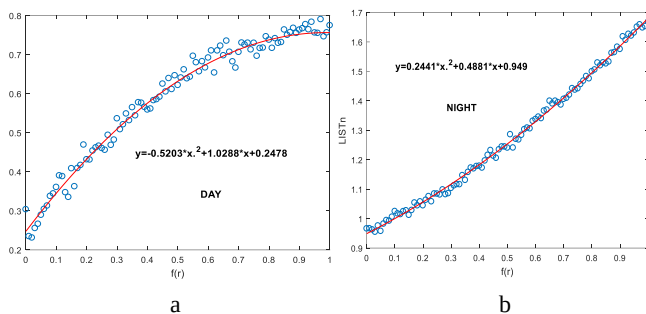


Fig. 3. Regression lines of dependence of LST_n from $f(r)$, determined by the method of concentrated rings: (a) according to the data obtained during a day; and (b) night

Based on the above-mentioned, the proposed method for determining the average area of the “heat island” can be presented in the form of the following points:

1. Measurement of LST in each pixel of the study area.
2. Calculating LST_n on all pixels.
3. Determining $f(r)$ on all pixels using the regression curves shown in Fig. 3.
4. Averaging values $f(r)$ on all pixels.

$$f(r)_{av} = \sum_{i=1}^N f(r)_i, \quad (18)$$

where N is the number of pixels;

5. Using the inverse transformation of the formula (15) in the form

$$r = \varphi(f(r), D, c) \quad (19)$$

substituting $f(r) = f(r)_{av}$, with known D, c the value r_{eq} - equivalent radius is calculated.

6. The average area of “heat islands” is calculated according to the formula $S_{h.i.}$.

$$S_{h.i.} = \pi r_{eq}^2. \quad (20)$$

Thus, formulas (15)-(20) form the basis of the proposed method for calculating the area of “heat islands” in urban areas.

Conclusions

Thus, the article proposes methods for determining the key indicators of the effect of “heat islands” arising in urban areas.

A modified building density index is proposed, which is highly informative, including the followings:

- a) the proposed index reaches an extremum when the known building density index of BDI и $NDVI$ are equalized;
- b) when the specified maximum is reached, it is easy to calculate the indicator of LST using known regression dependencies of BDI and $NDVI$ from LST .

The method for calculating the area of “heat islands” is also proposed, based on the calculation of the equivalent radius using the known dependence function of the building density on the distance to the center of the urban area.

REFERENCES

1. Masoudi, M. and Tan, P. (2019), “Multi-year comparison of the effects of spatial pattern of urban green spaces on urban land surface temperature”, *Lands and Urban Planning*, Vol. 184, pp. 44-58, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.023>.
2. Zhang, Y. and Sun, L. (2019), “Spatial-temporal impacts of urban land use land cover on land surface temperature: Case studies of two Canadian urban areas”, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, Vol. 75, pp. 171-181.
3. Yang, J., Zhan, Yi, Xi, Xiaoc, Jianhong Cecilia, Xiad, Sune W. and Li, X., (2020), “Investigation the diversity of land surface temperature characteristics in different scale cities based on local climate zones”, *Urban Climate*, Vol. 34, 100700, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100700>.
4. Oke, T. R. (1982), “The energetic basis of the urban heat island”, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 108, Is. 465, pp. 1-24.
5. Ayanlade, A. (2017), “Variations in urban surface temperature: An assessment of land use change impacts over Lagos metropolis”, *Weather*, Vol. 72, Is. 10, pp. 315-319, DOI: <https://doi.org/10.1002/wea.2925>.
6. Maishella, A., Dewantoro, B. and Aji, M. (2020), “Correlation Analysis of Urban Development and Land Surface Temperature Using Google Earth Engine in Sleman Regency, Indonesia”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 540, 012018, DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012018>.
7. Tuholske, C., Caylor, K., Funk, C., Verdin, A., Sweeney, S., Grace, K., Peterson, P. and Evans, T. (2021), “Global urban population exposure to extreme heat”, *PNAS*, Vol. 118. No. 41, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2024792118>.
8. Zha, Y., Gao, J. and Ni, S. (2003), “Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 3, pp. 583-594.
9. Mwangi, P. W., Karanja, F. N. and Kamau, P. K. (2018), “Analysis of the relationship between land surface temperature and vegetation and built-up indices in upper-hill, Nairobi”, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-16, DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2018.61001>.
10. Bonafoni, S. and Keeratikasikorn, C. (2018), “Land surface temperature and urban density: multiyear modeling and relationship analysis using MODIS and landsat data”, *Remote Sens*, Vol. 10, Is. 9, 1471, DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10091471>.

Received (Надійшла) 21.02.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.04.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Бекірова Лала – доктор технічних наук, доцент, кафедра приладобудування, Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан;

Lala Bekirova – Doctor of technical science, Assistant Professor, Instrumentation Engineering Department, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan;

e-mail: lala_bekirova@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0584-7916>.

Мамедова Есмiра – заступниця начальника відділу, Інститут космічних досліджень природних ресурсів Національного аерокосмічного агентства, Баку, Азербайджан;

Esmira Mammadova – Deputy head of department, Institute of Space Researches of Natural Resources of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan;

e-mail: esimammedova1985@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5618-5281>.

Бунятова Ельвіра – кандидат технічних наук, асистентка кафедри приладобудування, Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан;

Elvira Bunyatova – PhD, Assistant, Instrumentation Engineering Department, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan;

e-mail: jenifer671.3@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6167-846X>.

Розробка методики розрахунку основних показників островів тепла в місті

Бекірова Лала, Мамедова Есмiра, Бунятова Ельвіра

Анотація. Стаття присвячена розробленим методикам розрахунку основних параметрів «острівців тепла», які виникають у густонаселених міських територіях. Хоча зображення дистанційного зондування ідеально використовується для відстеження та виявлення частих змін ґрунтового покриття в містах та прилеглих районах, у результаті сталої урбанізації та для розрахунку ключових параметрів «островів тепла», які спостерігаються в густонаселених міських районах, супутникові зображення вручну виконуються в цифровому вигляді. Внесення параметричного зображення в карту земного покриття з використанням існуючих методів класифікації є тривалим процесом, тому запропоновано методи визначення основних показників впливу «острівців тепла» в міських районах. Сформульовано модифікований індекс щільності забудови, який є високоінформативним, що включає таке: (а) запропонований індекс досягає екстремуму, коли відомі індекси щільності забудови BDI та NDVI вирівнюються, (б) коли досягається заданий максимум, це надає можливість легко розрахувати показник LST, використовуючи відомі регресійні залежності BDI та NDVI від LST. Розроблено метод розрахунку площі «острівців тепла» на основі розрахунку еквівалентного радіуса з використанням відомої функції залежності щільності забудови від відстані до центру міської території. Наше дослідження показує, що розподіл будівель і нахил рельєфу впливають на температуру поверхні (LST), крім того, співвідношення різних LST різняться в містах різного розміру, і кожне місто має різницю температур в LST, тому є міські острова опалення. Для зменшення впливу важливо визначити характеристики теплового середовища в містах різного розміру. Міста в усьому світі все більше цінують озеленення міста як ефективний захід для зменшення негативного впливу міських островів опалення з різною кількістю та типами ландшафтних розмірів, різними статистичними методами, що використовуються в різних дослідженнях, а також залежністю від метричного масштабу та контексту. розбіжності між містами та нами, може подолати ці проблеми, проводячи порівняльні дослідження часу та простору з використанням послідовної методології.

Ключові слова: острівці тепла; міська територія; температура поверхні; інформативність; метод.

Разработка методик расчета основных показателей тепловых островов в городской территории

Бекирова Лала, Мамедова Эсмiра, Бунятова Эльвира

Аннотация. Статья посвящена разработанным методикам расчета основных параметров «островов тепла», возникающих в условиях плотной городской застройки. Хотя изображения дистанционного зондирования идеально подходят для отслеживания и обнаружения частых изменений растительного покрова в городах и прилегающих районах в результате устойчивой урбанизации, а также для расчета ключевых параметров «островов тепла», наблюдаемых в густонаселенных городских районах, спутниковые снимки вводятся в цифровой виде вручную. превращения параметрического изображения в карту земного покрова с использованием существующих методов классификации – длительный процесс, в связи с чем предлагаются методы определения основных показателей влияния «островов тепла» на городские территории. Сформулирован модифицированный индекс плотности застройки, обладающий высокой информативностью, включающий: (а) предлагаемый индекс достигает экстремума при уравнивании известных индексов плотности застройки BDI и NDVI, (б) при достижении заданного максимума легко рассчитать показатель LST, используя известные регрессионные зависимости BDI и NDVI от LST. Разработан метод расчета площади «островов тепла» на основе расчета эквивалентного радиуса с использованием известной функции зависимости плотности застройки от расстояния до центра городской территории. Наше исследование показывает, что на температуру поверхности (ТПН) влияет размещение зданий и уклон рельефа, кроме того, соотношения разных ТПН различаются в городах разного размера, и каждый город имеет разность температур ТПН, поэтому есть городские острова обогрева. Для снижения воздействия важно определить характеристики тепловой среды в городах разного размера. Городское озеленение все больше ценится городами по всему миру как эффективная мера снижения негативного воздействия городских островов обогрева, с разным количеством и типами ландшафтных измерений, разными статистическими методами, используемыми в разных обследованиях, а также зависимостью от метрической шкалы и контекстуальными факторами. различия между городами и нами, могут преодолеть эти проблемы, проводя сравнительные исследования времени и пространства с использованием последовательной методологии.

Ключевые слова: острова тепла; городская территория; температура поверхности; информативность; метод.

В. М. Триснюк, Т. В. Триснюк, А. В. Курило, Ю. М. Голован, Є. Ю. Пашенко

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОРГАНІВ АДМІНІСТРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

Анотація. Актуальність. Роботу присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми в галузі інформаційних технологій – аналізу систем інформаційно-аналітичного забезпечення у сфері адміністративного управління з урахуванням вимог комплексності, підтримки прийняття управлінських рішень на базі знання-орієнтованих засобів, а також інтеграції систем інформаційно-аналітичного забезпечення з дотриманням інтероперабельності. **Результати.** Проведена деталізація функцій органів адміністративного управління та особливостей діяльності в сучасних умовах, яка показує, що як основний засіб в підготовці рішень розглядається інформаційний простір, що, у свою чергу, потребує створення національної системи інформаційних ресурсів та відповідної електронної інфраструктури країни. Побудовано концептуальні структури органу управління та запропонована модель інформаційно-аналітичної діяльності в органі управління, для забезпечення розв'язування проблем інформаційно-аналітичної діяльності. **Науковими результатами** досліджень є основи нової теорії ситуаційного регулювання технологічних процесів в органі управління при автоматизованій обробці інформаційних потоків, застосування поняття „виконавчої обов'язковості” з реалізацією відповідної політики, теорія обробки інформаційних документальних потоків як складова теорії телетрафіку, моделі дослідження специфіки інформаційного навантаження автоматизованої системи в стаціонарному режимі. На підставі цих парадигм визначено можливість побудови комплексних корпоративних систем на базі апробованих рішень, при цьому складовими загальної методології використання інформаційних технологій мають бути чинники, отримані в результаті наших досліджень.

Ключові слова: адміністративне управління; інформаційно-аналітична діяльність; інформаційно-аналітичне забезпечення; інформаційно-аналітична система; інтеграція систем; інтероперабельність; інформаційні ресурси; інформаційні технології.

Вступ

На сучасному етапі, пов'язаному з розвитком інформаційного суспільства та його цифровою трансформацією, суттєво зростають вимоги до рівня інформатизації різних сфер діяльності. При цьому особливого значення набуває використання нових інформаційних технологій для забезпечення інформаційно-аналітичної діяльності органів адміністративного управління, що в умовах проведення соціально-економічних реформ, розширення міжнародного співробітництва, розвитку демократизації суспільства стає безпосереднім чинником економічного зростання, забезпечення обороноздатності країни та соціально-політичної стабільності.

Наявність значної уваги до інформатизації органів управління, яка приділяється не лише керівництвом країни, але й з боку науковців, фахівців з інформатики та користувачів – працівників органів управління, підтверджується відповідними нормативними та директивними документами, значною кількістю публікацій в засобах масової інформації та в наукових виданнях, високим рівнем представництва на науково-технічних та практичних конференціях в нашій країні та в різних країнах світу, введенням відповідних рубрик в наукових журналах та програмах конференцій. Є всі підстави стверджувати, що напрям інформатизації органів управління має велику актуальність. Про це свідчить й досвід інших країн, зокрема США, Канади, Південної Кореї, Німеччини, Естонії, ініціативи щодо формування інформаційного простору урядів країн Європейської співдружності. За останні роки науки основи інформатизації збагатилися відповідними рішеннями, моделями та алгоритмами, які знайшли відповідники в інформаційних системах різних органів управління та дер-

жавної влади [1]. Разом із тим на теперішньому етапі, пов'язаному з відкритістю управлінської діяльності, її інтенсифікацією та динамічністю, зростанням ролі аналітичної складової, назрілою є потреба у новому підході до розв'язання задач управління на інформаційно-аналітичній основі, який би враховував сучасне уявлення про інформацію як про інтелектуальний продукт – знання, як важливий ресурс суспільства, і який спирався б на забезпечення комплексності й інтегрованості рішень [2-8].

Мета роботи полягає в розробці, аналізі й синтезі автоматизованих систем інформаційно-аналітичного забезпечення (АСІАЗ) органів адміністративного управління, що базуються на сучасних інформаційних комплексах, як головних елементів інфраструктури інформаційного простору країни та сфери управління.

Виклад основного матеріалу

Систему адміністративного управління визначено як множину елементів $\{E_n^{(s)}, E_m^{(o)}\}$, що знаходяться у взаємодії один з одним. Ці взаємодії уявляють собою форми і процедури суспільних відносин, завдяки яким реалізуються прямі і зворотні зв'язки між суб'єктами й об'єктами управління (рис. 1).

У загальному виразі структуру системи адміністративного управління як складної динамічної системи $S(t)$ можна описати множиною

$$S(t) = \{E(t), R(t), Z(E(t)), F(E(t))\}, \quad (1)$$

де $E(t)$ – множина елементів, що утворюють систему; $R(t)$ – множина відношень (зв'язків) між елементами; $Z(E(t))$ – множина станів елементів; $F(E(t))$ – множина функцій, що виконує система.

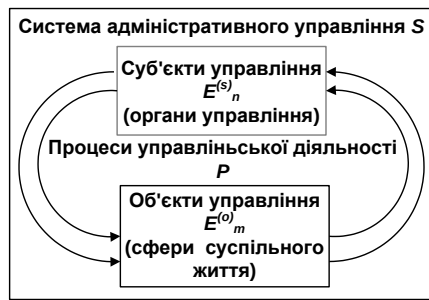


Рис. 1. Системне уявлення сфери управління

Стосовно кожного органу як суб'єкту управління можна застосувати такі гіпотези, що структура суб'єкту є нестационарною, в структурі мають місце значна кількість нелінійних залежностей, часті зовнішні впливи розбивають ряди вихідних змінних на короткі статистично неоднорідні послідовності, що утруднює коректне розв'язання задач прийняття рішень. В цих умовах функціонування органів управління має спиратись на технології автоматизації інформаційно-аналітичної діяльності (ІАД). Визначено місце ІАД в адміністративному управлінні (рис. 2).

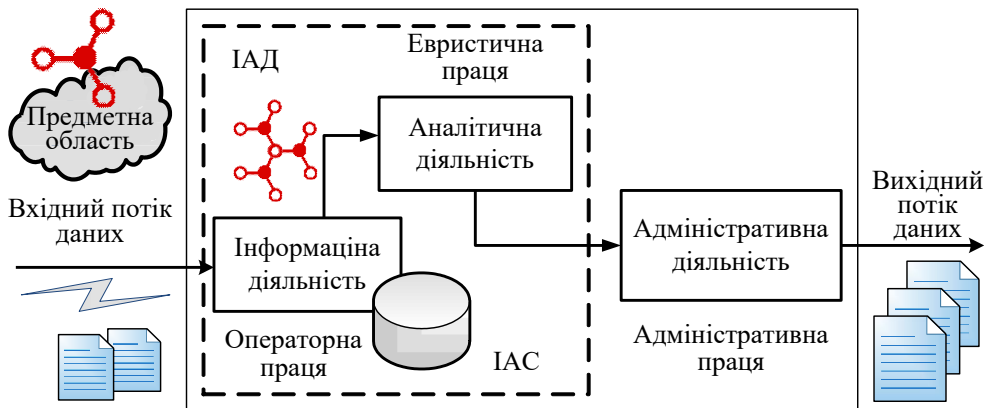


Рис. 2. Місце інформаційно-аналітичної діяльності в адміністративному управлінні

Кожний елемент E_i може бути представлений як

$$E \supset (x, y, z, u, w, f, g), \quad (2)$$

де $x = x(t)$ – вхідний інформаційний потік, $y = y(t)$ – вихідний інформаційний потік (реакція системи на вхідний вплив), $u = u(t)$ – управляюча дія, $w = w(t)$ – вплив зовнішнього середовища, $z = z(t)$ – внутрішній стан системи. Ці складові подаються у вигляді кінцевої множини функцій часу t . Через f і g визначаються функціонали, що відображають поточне значення внутрішнього стану $z(t)$ і вихідного потоку $y(t)$. Органи управління слід віднести до класу складних соціальних нетрадиційних систем завдяки своїй унікальності, здатності еволюціонувати у часі, змінюючи структуру і функції, разом із цим змінюючи й самі процеси управління. [9] Таким чином орган управління має діяти в умовах постійної адаптації. Важливим елементом таких систем є наявність ОПР – особи, що приймає рішення (рис. 3).

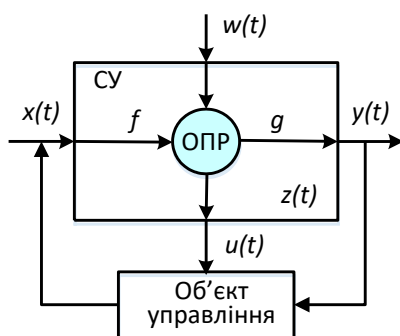


Рис. 3. Роль ОПР в системі управління (СУ)

Перед ОПР постає спочатку проблема пошуку поля (стратегії) задовольняючих дій, а потім – проблема вибору кращої дії, тобто рішення в цьому полі (стратегії).

Кожна із проблемних ситуацій потребує управління системою, під яким розуміється зміна якісних і кількісних характеристик елементів і відношень, що утворюють структуру системи. Проблемною ситуацією, стосовно якої має бути прийняте рішення в процесі управління, є неузгодженість

$$\Delta Z = Z_K - Z_{II},$$

де Z_{II} та Z_K – стани об'єкта управління в початковий і кінцевий моменти заданого періоду управління.

У таких системах, як орган управління, прийняті рішення є управляючими впливами U_i у визначених точках траєкторії функціонування системи. Множина припустимих рішень U задається на основі змістовного аналізу конкретної задачі, а вибір із припустимої множини ефективного (найкращого) рішення $x^0 \in U$ є задачею оптимізації.

Оцінювання рішення передбачає наявність деякої моделі оцінювання на множині критеріїв $k_i(x)$, тобто

$$C(x) = F[w_i, k_i(x)],$$

де w_i – кількісні параметри моделі (вагові коефіцієнти), F – функціонал моделі. Крім того, прийняття рішення необхідно проводити шляхом вибору ефективної стратегії з урахуванням часового сценарію поведінки зовнішнього середовища $\zeta(t)$, кожному з яких має відповідати деяка траєкторія зміни структури, параметрів, керованих змінних.

В якості критерію ефективності прийняття рішень доцільно застосувати сформульований В.М. Глушковым принцип «своєчасності, оптимальності і комплексності рішення».

Тому кількісні параметри w_i моделі оцінювання будемо пов'язувати саме з оцінкою своєчасності прийняття рішення (тобто опрацювання певного документу).

Проведено аналіз функціонального аспекту діяльності органів управління та розглянуто основні класи задач, що розв'язуються існуючими методами. Процеси управління в цілому пов'язані з опрацюванням інформації (рис. 4), що надходить (X) у вигляді документів та збурюючих впливів W .

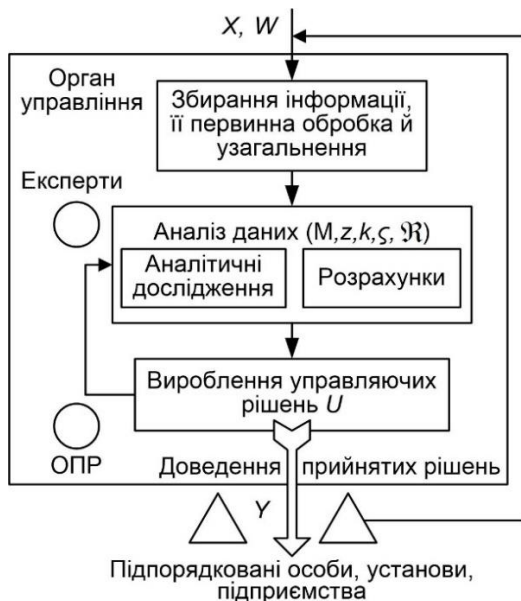


Рис. 4. Основні класи задач, що розв'язуються в органі управління

Центральною частиною є аналіз даних і відповідні розрахунки, що пов'язані з метою системи M , її станом z , а також у відповідності до вибраних критеріїв k , стратегій ζ і наявних ресурсів R . Що стосується задач прийняття рішень, вони зазвичай є багатокритеріальними, в них не існує єдиного аспекту або єдиної властивості, що оцінює якість прийнятого рішення.

Означено, що на передній край інформаційно-аналітичної діяльності виходить пошук знання для підтримки рішень, що є квінтесенцією інформаційного процесу[10].

Виходячи з пріоритетності інформаційного підходу наведено концепцію інформаційної взаємодії органу управління, пов'язану з розглядом взаємодії системи адміністративного управління (АУ) (рис. 5) з навколишнім середовищем.

При цьому можна зазначити, що вона має на виході два інформаційні вектори ($P_{вих}$ та $N_{вих}$) впливу на суспільну систему (СС) як керований об'єкт та підпадає під дію двох векторів (G та I) зворотного зв'язку – від громадської думки та засобів масової інформації. Одночасно АУ відпрацьовує запити на обслуговування, звернення та скарги від підприємств та

населення (вектори $P_{вх}$ та $N_{вх}$). Треба також враховувати міжнародну діяльність, яка визначається збурюючою дією впливу міжнародних організацій та відношень з іншими державами ($M_{вх}$) та вектором $M_{вих}$ відповідних державних рішень.

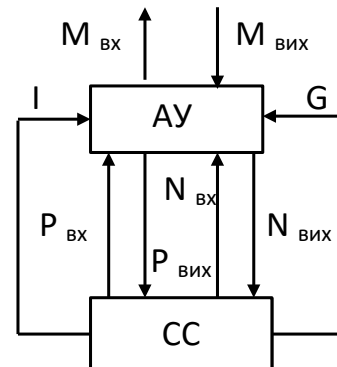


Рис. 5. Інформаційні потоки у системі адміністративного управління

Органи адміністративного управління (ОАУ) як суб'єкти є елементами системи адміністративного управління і на них також поширюється зазначена схема взаємодії.

Але з множини відношень, що описуються векторами $P_{вих}$, $N_{вих}$, G , I , $P_{вх}$, $N_{вх}$, $M_{вх}$, $M_{вих}$, кожному органу управління у межах його компетенції, визначеної для нього відповідними нормативно-правовими актами (наприклад, положенням про орган управління), відводяться певні підмножини $P'_{вих}$, $N'_{вих}$, G' , I' , $P'_{вх}$, $N'_{вх}$, $M'_{вх}$, $M'_{вих}$ (рис. 6).

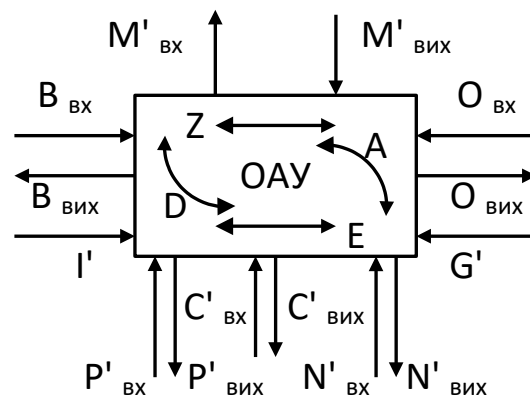


Рис. 6. Схема взаємодії органу управління в системі адміністративного управління

Крім того, органи управління в структурі адміністративного управління мають взаємодію з вище стоячими органами, (вектори $B_{вх}$, $B_{вих}$) та з іншими органами управління (вектори $O_{вх}$, $O_{вих}$), а також з підвідомчими підприємствами зі сфери управління (вектори $C_{вх}$, $C_{вих}$).

Безпосередньо в структурі органу управління циркулюють похідні інформаційні потоки як результат прогнозно-аналітичної діяльності (F), програмно-інформаційного моделювання (L), службового документообігу (D), а також заходів щодо захисту інформації (Z).

З урахуванням наведеного, розвиваючи теоретико-множинне визначення системи узагальнену модель системи S можна описати виразом

$$S = \langle A, E, R, P_s, P_a, M \rangle, \quad (3)$$

де A – активні елементи системи,

E – пасивні елементи системи,

R – зв'язки між елементами,

P_s – цілісний процес функціонування системи як набір паралельно взаємодіючих процесів P_a .

Таким чином, урахувавши опис (1) та модель, що наведено на рис. 6 процес функціонування інформаційної системи P'_s деякого органу управління можна описати кортежем паралельно взаємодіючих процесів:

$$P'_s = \left\langle \begin{matrix} P'_{ex}, P'_{bix}, N'_{ex}, N'_{bix}, G', I', \\ M'_{ex}, M'_{bix}, B_{ex}, B_{bix}, O_{ex}, \\ O_{bix}, C_{ex}, C_{bix}, F, D, L, Z \end{matrix} \right\rangle, \quad (4)$$

Виходячи з опису, наведеного у виразі (4), враховуючи визначені групи функцій, що задаються відповідним положеннями, модель інформаційно-

аналітичної діяльності в органі управління можна визначити таблицею основних напрямів цієї діяльності, в якій зокрема приведені позначення інформаційних потоків, що є визначальними для забезпечення напрямів діяльності.

За результатами визначено за доцільне застосування логіко-лінгвістичних інформаційних моделей (ЛЛІМ) та методології зростаючих пірамідальних мереж (ЗПМ), що реалізують гіпотезу про закономірності структурування інформації при її сприйнятті.

Висновки

Запропоновано концепцію системи інформаційних ресурсів сфери адміністративного управління, яка базується на вимогах:

створення та організації використання в державі системи національних інформаційних ресурсів,

створення системи інформаційних ресурсів органу управління шляхом інтеграції з просторовими (геоінформаційними) ресурсами;

застосування для підтримки інформаційно-аналітичної діяльності геоінформаційних систем, а також дотримання стратегії інформаційного менеджменту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bychenok, M.M. and Dovhyi, S.O. (2004), *Fundamentals of Informatization of Regional Security Management*, Scientific Opinion, Kyiv, 287 p.
2. Shorin, V.G. (1975), *System Analysis and Control Structures*, Book Eight, Knowledge, 1975. 304 p.
3. Butko, I. (2021). "The use of geospatial information by public authorities to support the decision making of management", *Advanced Information Systems*, Vol. 5(1), No. 1, pp. 39–44, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.05>.
4. Nechausov, A., Mamusuč, I. and Kuchuk, N. (2017), "Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyper-convergent infrastructures", *Сучасні інформаційні системи*, Vol. 1, No. 2, pp. 21 – 26, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.
5. Tverytnykova, E., Demidova, Y., & Drozdova, T. (2021). Management system of occupational safety at Ukrainian enterprises: international and European dimension. *Сучасні інформаційні системи*, 5(1), pp. 45–53, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.06>.
6. Mozhaiev, M., Kuchuk, N. and Usatenko, M. (2019), "The method of jitter determining in the telecommunication network of a computer system on a special software platform", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, Vol. 4 (10), pp. 134-140, DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.134>.
7. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. (2019), "Improving Big Data Centers Energy Efficiency: Traffic Based Model and Method", In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (eds) *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Springer, Cham, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8.
8. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, 2018, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>.
9. Trofimchuk, O.M., Adamenko, O.M. and Trisnyuk, V.M. (2021), **Geoinformation technologies of environmental protection of the nature reserve fund**, Suprun VP., Ivano-Frankivsk, 343 p.
10. Nesterenko, O. (2018), "From Big Data to innovative economy", *Formation of Knowledge Economy as the Basis for Information Society*, International Academy of Information Science, Kyiv-Amsterdam-Paris, pp. 118-122.

Received (Надійшла) 02.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.05.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Триснюк Василь Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища, Інститут телекомунікацій і глобального Інформаційного простору НАН України, Київ, Україна;
Vasyl Trysnyuk – Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Head of the environmental research department, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine;
 e-mail: trysnyuk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879>.

Триснюк Тарас Васильович – кандидат технічних наук, науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального Інформаційного простору НАН України, Київ, Україна;

Taras Trysnyuk – Philosophy Doctor (PhD) in Engineering, Researcher, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: taras24@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242>.

Курило Анатолій Васильович – аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального Інформаційного простору НАН України, Київ, Україна;

Anatolii Kurilo – postgraduate student, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: comandor1505@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6694-5117>.

Голован Юрій Миронович – аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального Інформаційного простору НАН України, Київ, Україна;

Yurii Holovan – postgraduate student, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: directa@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-9310>.

Пашченко Євген Юрійович – кандидат економічних наук, старший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального Інформаційного простору НАН України, Київ, Україна;

Yevhen Pashchenko – Philosophy Doctor (PhD) in Economic, Senior Researcher, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: pobeda2000@meta.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8703-4796>.

Системный анализ информационно-аналитического обеспечения органов административного управления

В. М. Трыснюк, Т. В. Трыснюк, А. В. Курило, Ю. М. Голован, Е. Ю. Пашченко

Аннотация. Актуальность. Работа посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы в области информационных технологий – анализа систем информационно-аналитического обеспечения в сфере административного управления с учетом требований комплексности, поддержки принятия управленческих решений на базе знаний-ориентированных средств, а также интеграции систем информационно-аналитического обеспечения с соблюдением интероперабельности. **Результаты.** Произведена детализация функций органов административного управления и особенностей деятельности в современных условиях, показывающая, что как основное средство в подготовке решений рассматривается информационное пространство, что, в свою очередь, требует создания национальной системы информационных ресурсов и соответствующей электронной инфраструктуры страны. Построены концептуальные структуры органа управления и предложена модель информационно-аналитической деятельности в органе управления для обеспечения решения проблем информационно-аналитической деятельности. **Научными результатами** исследований являются основы новой теории ситуационного регулирования технологических процессов в органе управления при автоматизированной обработке информационных потоков, применение понятия "исполнительной обязательности" с реализацией соответствующей политики, теория обработки информационных документальных потоков как составляющая теории телетрафика, модели исследования специфики информации ной нагрузки автоматизированной системы в стационарном режиме. На основании этих парадигм определена возможность построения комплексных корпоративных систем на базе апробированных решений, при этом составляющими общей методологии использования информационных технологий должны быть факторы, полученные в результате наших исследований.

Ключевые слова: административное управление; информационно-аналитическая деятельность; информационно-аналитическое обеспечение; информационно-аналитическая система; интеграция систем; интероперабельность; информационные ресурсы; информационные технологии.

System analysis of information and analytical support of administrative management

Vasyl Trysnyuk, Taras Trysnyuk, Anatolii Kurilo, Yurii Holovan, Yevhen Pashchenko

Abstract. Relevance. The work is devoted to solving a topical scientific and applied problem in the field of information technology – analysis of information and analytical support systems in the field of administrative management, taking into account the requirements of complexity, support management decisions based on knowledge-oriented tools, and integration of information and analytical support systems. interoperability. **Results.** Conceptual structures of the governing body and ASIAs are constructed, the model of information-analytical activity in the governing body is offered, ASIAs is structured with allocation of their basic structural elements. The unified architecture of ASIAs is offered, the structure of the necessary components of ASIAs realizing processes of collecting and transformation of the information (documents) is defined. **The scientific results** of research are the basis of a new theory of situational regulation of technological processes in the governing body in the automated processing of information flows, the application of the concept of "executive obligation" with the implementation of appropriate policies, theory of information document flow processing as a component of tele-traffic theory, models of research of specificity of information load of ASIAs in stationary mode, intensity of processing of document flows and interaction of processing processes, solving the problem of structuring knowledge based on the methodology of growing pyramidal networks, based on the theory of logical-linguistic information models, and ontological descriptions of information. Based on these paradigms the possibility of construction of ASIAs as complex corporate systems on the basis of the tested decisions is defined. Thus, components of the general methodology of use of information technologies should be the factors received as a result of researches of the given work.

Keywords: administrative management; information-analytical activity; information-analytical support; information-analytical system; systems integration; interoperability; information resources.

Intelligent information systems

UDC 004.891.3

DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.08>

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

TEMPORAL REPRESENTATION OF THE ESSENCES OF THE SUBJECT AREA FOR THE CONSTRUCTION OF EXPLANATIONS IN INTELLIGENT SYSTEMS

Abstract. The **subject** of research in the article is the processes of constructing explanations in intelligent systems using causal relationships. The aim is to develop a representation of the entities of the subject area, taking into account the temporal aspect in order to represent the binary relations in time between the properties of the same entity. The construction of temporal relations between the properties of entities makes it possible to determine the probabilistic causal relationships between the states of these entities and use these dependencies to form explanations for the implemented decision-making process in the intelligent system, taking into account possible alternatives. **Tasks:** structuring the objects of the subject area, taking into account their essential properties for the decision-making process, including temporal; definition of classes of essences of subject area; determination of equivalence classes of entities of the subject area taking into account changes in the properties of these entities over time; development of a temporal model of representation of essences of subject area for construction of explanations in intellectual systems on the basis of definition of dependences in time between properties of essences. **The approaches used** are: set-theoretic approach, which is used to describe the classes of entities and classes of equivalence of entities of the subject area; linear temporal logic, which provides a representation of the relationship between entities in the temporal aspect. The following **results** were obtained. The structuring of the objects of the subject area is performed taking into account their properties, which are used in the decision-making process in the intellectual system; defined classes of entities; the classes of equivalence of entities of the subject area are defined as a kind of class of entities with the same values of key attributes, which makes it possible to take into account changes in these values over time; a temporal model of representation of the essences of the subject area is developed, which takes into account their static, dynamic properties and properties of time. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows. An equivalence class for entities is distinguished, which contains entities with the same key static properties and different dynamic properties considering the time of their change, which allows to reflect changes in the state of the entity in the decision-making process in the intelligent system. The temporal model of representation of essences of subject area which contains classes of equivalence of essences, and also temporal communications between properties of elements of these classes is offered. The selection of classes of equivalence of entities makes it possible to present the decision-making process in the intellectual system in the form of a sequence of temporal connections between the properties of entities of the subject area, and to form on this basis casual relationships between states of entities.

Keywords: intellectual system; explanation; essence; causality; causation; temporality.

Introduction

Today, intelligent systems use sophisticated decision-making algorithms that are not "transparent" to users of such systems. The user usually uses only those solutions that match his requirements and that he trusts. Therefore, it is important to ensure user confidence in the results of the intelligent system, making "transparent" causal dependencies that justify the decision [1].

For example, the choice of items offered by the recommendation system (goods, films, conferences, etc.) largely depends on the user's trust in the proposals received [2]. If the user believes that the proposed items are not in his interests, but the interests of the owners of the recommendation system, he will not take into account the recommended items in his choice.

Explanations in the form of a sequence of causal relationships that make the decision-making process "transparent" and the intelligent system, allow the user to understand why such a decision was made [3]. Presentation of the explanation in the form of a set of causal dependencies makes it possible to compare the obtained and alternative solutions. Decisions to be made on the basis of counterfactuals are considered as alternatives. The latter are facts of possible actions that have not yet

been implemented in practice [4]. As a result, a comparison of the solution obtained by the intelligent system and alternative solutions can be used as an explanation [5]. This comparison allows the user to make sure that the solution is the most effective given the requirements. Therefore, the use of explanations based on causal relationships makes it possible to increase user confidence in the results of the intelligent system.

To obtain causal dependencies that explain the results of the intelligent system, it is necessary to take into account the relationships between objects (entities) of the subject area used in the decision-making process. Dependencies between entities can be static or dynamic. The first reflect the constant properties of the subject area. They act as restrictions when performing actions in the intelligent system. The second reflects changes in the state of entities in the decision-making process and is based on the temporal relationship between the properties of such entities.

The relevance of the topic of this work is due to the fact that the formal description of the essence of the subject area, taking into account the temporal aspect makes it possible to build temporal and then causal relationships that reflect the relationship between input and intelligent solutions. Such dependencies make it

possible to explain the reasons for the decision and, accordingly, increase user confidence [6, 7].

Modern approaches to building causal relationships to obtain explanations are being developed according to the XAI (Explainable Artificial Intelligence) program [8]. These approaches are based on a three-level hierarchy of causality [9].

The first level reflects the existing statistical patterns, the second - the impact of causal relationships on new results, and the third is the level of explanation of causal relationships [10].

In [11, 12] relational models of the set of entities of the subject area are substantiated and proposed and the importance of using such models to build causal dependencies using d-separation for connections of entities that are not identically distributed is substantiated. However, this approach focuses mainly on static relationships between entities and does not take into account the change of such relationships over time when performing the process of decision making in an intelligent system.

Temporal relationships between the states of the decision support process were considered in [13-15]. Such dependencies make it possible to order states that occur directly after each other [14], or have intermediate states [15]. The proposed approaches to the construction of temporal dependences [16, 17] make it possible to build statistical relationships between states. However, in the selection of such states, insufficient attention is paid to the relationship between the properties of the entities of the subject area. These connections directly affect the decision-making process, as well as reflect the results of this process. Taking into account such relationships makes it possible to justify the sequence of actions of the decision-making process in the intelligent system.

Thus, the construction and use of the temporal representation of entities makes it possible to build causal relationships based on the relationships between the

properties of entities that change over time. Such dynamic dependencies create conditions for adaptation of the explanation in the decision-making process taking into account current requirements of the user and external influences.

The aim of the article is to develop a representation of the entities of the subject area, considering the temporal aspect in order to present binary relationships in time between the properties of the same entity.

The construction of temporal relationships between the properties of entities makes it possible to determine the probabilistic causal relationships between the states of these entities and use these relationships to form explanations for the implemented decision-making process in the intelligent system, taking into account possible alternatives based on counterfactuals.

To achieve this goal the following tasks are solved:

- structuring the essences of the subject area, taking into account their essential properties for the decision-making process, including temporal;
- definition of classes of entities of the subject area;
- determination of equivalence classes of entities of the subject area, considering changes in the properties of these entities over time;
- development of a temporal model of representation of essences of subject area for construction of explanations in intellectual systems on the basis of definition of dependences in time between properties of essences.

Temporal representation of the essences of the subject area as objects of the decision-making process in the intellectual system

The essences of the subject area used in the decision-making process are characterized by many properties.

A structured description of these properties is given in the Table 1.

Table 1 – Structuring the properties of entities used in the decision-making process

Properties	Differences	Use in constructing explanations
Key (static)	Define the essence throughout the decision-making process	Set limits on possible actions with entities
Dynamic	Determine the state of the entities in the decision-making process	Reflect the temporal relationships between the actions of the decision-making process
Temporal	Moments of time or time intervals	Determine the periods of relevance of the dynamic properties of the entity

Entity properties can be static or dynamic. The first are key to the essence and characterize it throughout the decision-making process. The second characterizes the current state of the essence, i.e. changes over time. To compare entities and select classes of similar entities, it is necessary to take into account their static properties. The sequence of actions of the decision-making process in the intelligent system is reflected through the sequence of states of entities in time. Therefore, the dynamic properties of entities make it possible to reflect the temporal relationships between the actions of the decision-making process. Since temporal connections reflect causal relationships between the actions of the decision-making process, their generalization makes it

possible to build probabilistic causal relationships for the decision-making process.

Formally define the essence of the subject area from the standpoint of their use in the decision-making process. Each entity e_j is characterized by properties (attributes) $b_j^{(k)}$ that are essential to the decision-making process, forming a subset: $B_j \subseteq B$:

$$B_j = \{b_j^{(k)}\}, k = \overline{1, K}. \quad (1)$$

Properties (1) determine the differences of the entity, its state, the operations performed by the entity, the time intervals in which these properties are valid.

For example, for the object "Contractor" such properties may be:

$b_1^{(1)}$ – role that determines the competencies of the employee,

$b_1^{(2)}$ – salary,

$b_1^{(3)}$ – date from which the contractor receives this salary.

The attributes of the "Goods" object in the recommendation system, for example, are:

$b_2^{(1)}$ – cost,

$b_2^{(2)}$ – time for which the value was determined,

$b_2^{(3)}, \dots, b_2^{(K)}$ – user properties that are of value to the consumer and which were used in the construction of recommendations.

A set of domain objects consists of subsets of similar entities that have the same set of properties. Such subsets represent classes of entities.

Definition 1. The entity class E_i of the domain ϵ is a set of entities $e_{i,j}$ with the same finite set of properties - attributes:

$$E_i = \{e_{i,j} : (\forall j) \exists B_i = \{b_i^{(k)}\}\}. \quad (2)$$

Each of the attributes $b_i^{(k)}$ has a finite set of values $C_i^{(k)}$, and the values $c^{(q,l)}$, $c^{(k,l)}$ of the different attributes $b_i^{(q)}$ та $b_i^{(k)}$ do not match:

$$C_i^{(k)} = \{c^{(k,l)} : (\forall q \neq k) c^{(q,l)} \neq c^{(k,l)}\}. \quad (3)$$

According to (3), the set of attributes B_i determines the set of possible values of the properties of the entities included in the class E_i . That is, each class is defined by a set of valid attribute values:

$$E_i = \{e_{i,j} \mid (\forall j \forall k) c_{i,j}^{(k,l)} \in C_i^{(k)}\}. \quad (4)$$

Note that subsets $C_i^{(k)}$ differ for entities of different classes, ie for classes E_h and E_i with sets of values k – attribute $C_h^{(k)}$ and $C_i^{(k)}$ accordingly the condition is satisfied:

$$(\forall E_i) \exists h \neq i : C_h^{(k)} \neq C_i^{(k)}. \quad (5)$$

For example, for the "Performer" and "Unit Manager" classes, the possible values for the "Role" attribute will be different.

According to (4) and (5), each instance $e_{i,j}$ of a class entity E_i is completely specified by a set of values of its attributes $\{c_{i,j}^{(k,l)}\}$:

$$e_{i,j} = \{c_{i,j}^{(k,l)}\}. \quad (6)$$

Information about the essence can be obtained at different times in the formation of decisions in the

intelligent system. Therefore, elements of a class E_i can represent one entity in different states. Each state is determined by the current attribute values $b_i^{(k)}$. The state of the decision-making process in the intellectual system contains a set of states of entities with which this process operates.

Changing the state of entities is associated with the implementation of actions in the decision-making process.

Therefore, the study of transitions between states makes it possible to identify causal links between these actions.

According to the performed structuring, the set of attributes B_i of each entity $e_{i,j}$ contains subsets of key attributes B_i^{key} , attributes with variable values $B_i^{dynamic}$, and time attributes: B_i^{time} :

$$B_i = B_i^{key} \cup B_i^{dynamic} \cup B_i^{time}. \quad (7)$$

Key attributes distinguish between entities. These attributes do not change in the decision-making process in the intelligent system, they are static. Attributes with variable values characterize the state of the entity and change over time.

Time attributes define the time points or time interval for which the values of the attributes in the subset $B_i^{dynamic}$ are valid.

Selecting a subset of key properties B_i^{key} makes it possible to compare entities and combine identical entities into equivalence classes. We consider entities to be equivalent when they have the same values of key attributes. That is, equivalent entities differ only in their state.

Based on the definition of the set of attributes (7), we introduce the equivalence relation of entities.

Definition 2. The equivalence relation of entities $e_{i,j} \sim e_{i,m}$ from one class E_i is a binary relation that is satisfied in case of coincidence of values $c_{i,j}^{k,l}$ and $c_{i,m}^{k,l}$ of the key attributes of these entities:

$$e_{i,j} \sim e_{i,m} : (\forall k \forall l) c_{i,j}^{k,l} = c_{i,m}^{k,l} \mid (\forall k) b_i^{(k)} \in B_i^{key}. \quad (8)$$

This relationship makes it possible to determine the equivalence of instances of the same entity at different times

Therefore, expression (8) considers only the attributes of the subset B_i^{key} and does not consider the variable properties and attributes of time.

The equivalence relation has the properties of symmetry, reflectivity and transitivity.

The first property specifies the equivalence of entity $e_{i,j}$ and $e_{i,m}$ from class E_i instances if attribute values were fixed at different times t_m and t_j :

$$(\forall j \forall m) (e_{i,j} \sim e_{i,m}) \Rightarrow (e_{i,m} \sim e_{i,j}), t_m \neq t_j. \quad (9)$$

The property of reflectivity determines the equivalence of the same entity in different decision-

making processes in an intelligent system that run simultaneously:

$$(\forall j \forall i)(e_{i,j} \sim e_{i,j}). \quad (10)$$

The property of transitivity for entities of one class is defined as follows:

$$(\forall j \forall g \forall m)(e_{i,j} \sim e_{i,g}) \wedge (e_{i,g} \sim e_{i,m}). \quad (11)$$

In accordance with (11), the set of equivalent entities can be supplemented at each implementation of the decision-making process in the intelligent system. In addition, information about new entities is compared with known entities $e_{i,j}$.

Thus, it is possible to compare equivalent instances of the entity that were involved in the decision-making process at different points in time. Such entities constitute a class of equivalence.

Definition 3. The equivalence class $[e_i]$ contains instances of the entity $e_{i,j}$, that are related by the equivalence relationship (ie have identical values of the key attributes:

$$[e_i] = \{e_{i,j} : (\forall i)e_i \sim e_{i,j}\}. \quad (12)$$

Thus, an entity class E_i is an equivalence class $[e_i]$ if its elements $e_{i,m} \neq e_{i,j}$ contain the same attribute values $c_{i,m}^{k,l} = c_{i,j}^{k,l}$ from the set: B_i^{key} :

$$E_i \equiv [e_i] \left| \left(\forall k : b_i^{(k)} \in B_i^{key} \right) \left(\forall e_{i,m} \neq e_{i,j} \right) c_{i,m}^{k,l} = c_{i,j}^{k,l} \right|. \quad (13)$$

The practical significance of expression (13) is the ability to combine in one class of equivalence all records of the use of essence $e_{i,j}$ in different implementations of the decision-making process in the intelligent system.

For example, for a recommendation system, information about the nature of the product "Painting" may contain attributes of the name and author of the painting. These attributes belong to the set B_i^{key} . The attribute "Price" belongs to the set $B_i^{dynamic}$. The set

B_i^{time} contains the attribute "Date", which indicates the date the price changed.

The elements $e_{i,j}$ of each equivalence class differ only in the values of the properties from the subset $B_i^{dynamic}$ indicating the time when this value was set. This makes it possible to set binary temporal relationships $r_{i,j}^{i,s}$ (for a pair of elements) between an attribute $b_{i,j}^{(k)}$ and $b_{i,m}^{(k)}$ for an entity from class $[e_i]$ at time points $t_m > t_j$.

Temporal dependence is set by the temporal operator O :

$$r_{j,m}^{i,k} = b_{i,j}^{(k)} O b_{i,m}^{(k)} \quad (13)$$

Equation (12) specifies the binary temporal relationship between the elements of the class $[e_i]$. This relationship, depending on the temporal operator, sets the following sequence of changes in the value of the k – attribute of the e_i entity:

– the value of the attribute changes to the next discrete point in time t_m after the current moment t_j ;

the value of the attribute changes at one of the following time points, ie there may be intermediate time points between t_j and t_m ;

– the value of the attribute changes when a certain condition is met.

The temporal entity set model includes entity equivalence classes and binary temporal relationships between entity instance attributes within a single equivalence class $[e_i]$:

$$E = \{[e_i], \{r_{i,m}^{i,j}\}\}. \quad (14)$$

Consider an example of the implementation of such a model to describe the entities with which the recommendation system operates when building a recommended list of goods and services.

An example of recording five instances of the "4 PURPLE FLOCK DINNER CANDLES" entity is shown in the Fig. 1.

StockCode	Description	Quantity	InvoiceDate	UnitPrice
72800B	4 PURPLE FLOCK DINNER CANDLES	2	01.12.2010 12:49	2,55
72800B	4 PURPLE FLOCK DINNER CANDLES	12	05.12.2010 10:52	2,55
72800B	4 PURPLE FLOCK DINNER CANDLES	2	20.12.2010 13:43	5,06
72800B	4 PURPLE FLOCK DINNER CANDLES	1	05.01.2011 15:56	2,55

Fig. 1. Description of instances of entities

Static properties are StockCode, Description. Dynamic properties are Quantity, InvoiceDate, UnitPrice. Temporal dependencies, in particular, for the attribute UnitPrice are

$$(UnitPrice = 2,55) O (UnitPrice = 5,06),$$

for the Quantity attribute are

$$(Quantity = 2) O (Quantity = 12).$$

Conclusions

The structuring of the essences of the subject area is performed taking into account their properties, which are used in the decision-making process in the intellectual system.

Structuring has shown that the construction of causal dependencies on the decision-making process is based on

the formation of temporal relationships between the properties of these entities.

Binary temporal connections are typical of entity equivalence classes. They reflect the change in the value of one of the attributes of the entity over time.

The set of temporal connections reflects the decision-making process in the intelligent system. Therefore, the comparison of current, implemented dependencies with possible alternatives provides an opportunity to build explanations for this process.

An equivalence class for entities that contains instances with the same key static properties and different dynamic properties, taking into account the time of their

change, which allows to reflect changes in the state of the entity in the decision-making process in the intelligent system.

The temporal model of representation of essences of subject area which contains classes of equivalence of essences, and also temporal communications between properties of elements of these classes is offered. The selection of classes of equivalence of entities makes it possible to present the decision-making process in the intellectual system in the form of a sequence of temporal connections between the properties of entities of the subject area, to form on this basis casual relationships between states of entities and construct explanations.

REFERENCES

1. Tintarev N., Masthoff J. (2007) A survey of explanations in recommender systems. _The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPSIUI'07)_. P. 801-810.
2. Tintarev N., Masthoff J. (2012), "Evaluating the effectiveness of explanations for recommender systems", User Model User-Adap Inter., Vol. 22, pp. 399– 439, <https://doi.org/10.1007/s11257-011-9117-5>.
3. Halpern J. Y. and Pearl J. (2005), "Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes", The British Journal for the Philosophy of Science, Vol. 56 (4), pp. 843-887.
4. Чалий С. Ф., Лещинський В. О., Лещинська І. О. (2021) 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 : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", № 2 (6), С. 41-46.
5. . 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>
6. Леви́кін В. М., Чала О. В. (2018), Підтримка прийняття рішень в інформаційно-управляючих системах з використанням темпоральної бази знань. Сучасні інформаційні системи. Том 2, № 4. С. 101-107. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.4.17.
7. Castelvocchi D. (2016), "Can we open the black box of AI?" Nature, Vol. 538 (7623), pp. 20-23.
8. D. Gunning i D. Aha, (2019) "DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program", AI Magazine, Vol. 40(2), pp.44-58, doi: 10.1609/aimag.v40i2.2850.
9. Pearl J (2009) Causality: Models, Reasoning and Inference, 2nd ed. Cambridge University Press, USA.
10. Halpern J. Y., Pearl J. (2005), Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations. The British Journal for the Philosophy of Science. Vol.56 (4). P. 889-911.
11. . Maier M, Marazopoulou K, Jensen D (2014) Reasoning about Independence in Probabilistic Models of Relational Data. arXiv
12. Marazopoulou, Katerina, Maier, Marc, and Jensen, David. Learning the structure of causal models with relational and temporal dependence. In Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (2015).
13. Chalyi, S., & Leshchynskyi, V. (2020). Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. Advanced Information Systems, 4(3), 113–117. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.16>
14. Chala O. (2018) Models of temporal dependencies for a probabilistic knowledge base. Econtechmod. An International Quarterly Journal. Vol. 7, No. 3. P. 53 – 58.
15. Чала О. В. (2020) Модель узагальненого представлення темпоральних знань для задач підтримки управлінських рішень. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Системний аналіз, управління та інформаційні технології. № 1(3). С. 14-18. DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.03.
16. Chalyi S., Leshchynskyi 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, Vol. 6 (58), pp. 97-101. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.6.097>.
17. 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). P. 9-14. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.160205.

Received (Надійшла) 22.02.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2022

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 Chalyi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Professor of Information Control Systems Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: serhii.chalyi@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 Leshchynskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8690-5702>.

Темпоральне представлення сутностей предметної області для побудови пояснень в інтелектуальних системах

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси побудови пояснень в інтелектуальних системах з використанням причинно-наслідкових залежностей. **Метою** є розробка представлення сутностей предметної області з урахуванням темпорального аспекту з тим, щоб представити бінарні відношення у часі між властивостями однієї й тієї ж сутності. Побудова темпоральних відношень між властивостями сутностей дає можливість визначити ймовірнісні каузальні залежності між станами цих сутностей і використати ці залежності для формування пояснень щодо реалізованого процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі з урахуванням можливих альтернатив такого процесу. **Завдання:** структуризація об'єктів предметної області з урахуванням їх суттєвих для процесу прийняття рішень властивостей, в тому числі темпоральних; визначення класів сутностей предметної області; визначення класів еквівалентності сутностей предметної області з урахуванням змін властивостей цих сутностей з часом; розробка темпоральної моделі представлення сутностей предметної області для побудови пояснень в інтелектуальних системах на основі визначення залежностей у часі між властивостями сутностей. Використовуваними **підходами** є: теоретико-множинний підхід, який застосовується для опису класів сутностей та класів еквівалентності сутностей предметної області; лінійна темпоральна логіка, яка забезпечує представлення відношень між сутностями у темпоральному аспекті. Отримані наступні **результати**. Виконано структуризацію об'єктів предметної області з урахуванням їх властивостей, які використовуються у процесі прийняття рішень в інтелектуальній системі; визначено класи сутностей; визначено класи еквівалентності сутностей предметної області як різновид класу сутностей з однаковими значеннями ключових атрибутів, що дає можливість врахувати зміни цих значень з часом; розроблено темпоральну модель представлення сутностей предметної області, яка враховує їх статичні, динамічні властивості та властивості часу. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Виділено клас еквівалентності для сутностей, який містить сутності із однаковими ключовими статичними властивостями й різними динамічними властивостями з урахуванням часу їх зміни, що дає можливість відобразити зміни стану сутності у процесі прийняття рішення в інтелектуальній системі. Запропоновано темпоральну модель представлення сутностей предметної області, яка містить класи еквівалентності сутностей, а також темпоральні зв'язки між властивостями елементів цих класів. Виділення класів еквівалентності сутностей дає можливість представити процес прийняття рішення в інтелектуальній системі у вигляді послідовності темпоральних зв'язків між властивостями сутностей предметної області, та сформулювати на цій основі каузальні залежності між станами сутностей з подальшою побудовою пояснень як ланцюжка каузальних залежностей.

Ключові слова: інтелектуальна система; пояснення; сутність; каузальність; причинно-наслідковий зв'язок; темпоральність.

Темпоральное представление сущностей предметной области для построения пояснений в интеллектуальных системах

С. Ф. Чалий, В. А. Лещинский

Аннотация. Предметом исследования в статье являются процессы построения объяснений в интеллектуальных системах с внедрением причинно-следственных зависимостей. **Целью** является разработка представления сущностей предметной области с учетом темпорального аспекта с тем, чтобы представить бинарные отношения во времени между свойствами одной и той же сущности. Построение темпоральных отношений между свойствами сущностей позволяет определить вероятные каузальные зависимости между состояниями этих сущностей и использовать эти зависимости для формирования объяснений относительно реализованного процесса принятия решения в интеллектуальной системе с учетом возможных альтернатив такого процесса. **Задания:** структуризация объектов предметной области с учетом их существенных для процесса принятия решений свойств, в том числе темпоральных; определение классов сущностей предметной области; определение классов эквивалентности сущностей предметной области с учетом конфигураций параметров этих сущностей со временем; разработка темпоральной модели представления сущностей предметной области для построения объяснений в интеллектуальных системах на основе определения зависимостей во времени между свойствами сущностей. Используемыми **подходами** являются: теоретико-множественный подход, применяемый для описания классов сущностей и классов эквивалентности сущностей предметной области; линейная темпоральная логика, обеспечивающая представление отношений между сущностями в темпоральном аспекте. Получены следующие **результаты**. Выполнена структуризация объектов предметной области с учетом их свойств, используемых в процессе принятия решений в интеллектуальной системе; определены классы сущностей; определены классы эквивалентности сущностей предметной области как разновидность класса сущностей с одинаковыми значениями ключевых атрибутов, что позволяет учесть изменения этих значений со временем; разработана темпоральная модель представления сущностей предметной области, учитывающая их статические, динамические свойства и свойства времени. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем. Выделен класс эквивалентности для сущностей, содержащий сущности с одинаковыми ключевыми статическими свойствами и разными динамическими свойствами с учетом времени их изменения, что позволяет отразить изменения состояния сущности в процессе принятия решения в интеллектуальной системе. Предложена темпоральная модель представления сущностей предметной области, содержащая классы эквивалентности сущностей, а также темпоральные связи между свойствами элементов этих классов. Выделение классов эквивалентности сущностей дает возможность представить процесс принятия решения в интеллектуальной системе посредством последовательности темпоральных связей между свойствами сущностей предметной области, и сформировать на этой основе каузальные зависимости между состояниями сущностей с последующим построением объяснений как цепочки каузальных зависимостей.

Ключевые слова: интеллектуальная система; объяснение; сущность; каузальность; причинно-следственная связь; темпоральность.

Methods of information systems protection

UDC 004. 492.3+681.518

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.09>

Vladyslav Pashynskyykh, Yelyzaveta Meleshko, Mykola Yakymenko,
Dmytro Bashchenko, Roman Tkachuk

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

RESEARCH OF THE POSSIBILITIES OF THE C# PROGRAMMING LANGUAGE FOR CREATING CYBERSECURITY ANALYSIS SOFTWARE IN COMPUTER NETWORKS AND COMPUTER-INTEGRATED SYSTEMS

Abstract. The object of research in the article are the tools and capabilities of the C# programming language for the implementation of cybersecurity analysis software in local computer networks and computer-integrated systems. The relevance of the study is due to the importance of information security of computer and computer-integrated systems in government, military-industrial complex, private business etc., and due to the importance of training cybersecurity professionals in higher education to consider teaching examples in popular programming languages. The goal of the work is to research the possibilities of the C# programming language for the development of software that analyzes cybersecurity in local computer networks and computer-integrated systems. The tasks to be solved are: to develop software for scanning network device ports in computer networks and computer-integrated systems for information security audit, using tools and libraries of the C# programming language, to research the benefits and possibilities of using this programming language for this task. **Research methods:** theory of computer networks, object-oriented programming, theory of algorithms and data structures, theory of software testing. **Conclusions.** In this paper the possibilities and advantages of the C# programming language for developing cybersecurity analysis software for computer and computer-integrated systems were explored. In the course of work software that analyzes information security in local computer networks and computer-integrated systems was developed. This software can be used for educational purposes in learning the C# programming language and cybersecurity of computer systems. The developed software has the potential to be further improved and applied in various fields to test the cybersecurity of local computer networks and computer-integrated technologies.

Keywords: programming language; C#; cybersecurity; vulnerability analysis; port scanner; vulnerability scanner; computer systems; computer-integrated systems; computer networks; information attacks; information security audit.

Introduction

Cybersecurity is important for any activity related to the delimitation of access to information. Government agencies and foreign ministries, the military-industrial complex, private business, including Internet services – this is a small part of the list of consumers interested in keeping their information confidential from third parties.

Computer networks and computer-integrated technologies exist in almost all enterprises. There is a need to analyze their security, because an attacker may appear on the network, who will intercept important information and have a harmful effect on the system, and without analyzing the network, it will be very difficult to find his presence.

The goal of this work is to research of the possibilities of the C# programming language for the development of software that analyzes information security in local computer networks and computer-integrated systems.

The methods of computer network cybersecurity analysis were studied and it was found that one of the basic and mandatory methods of any security analysis is the method based on scanning the ports of devices connected to the local network. It is used both in computer networks [1-3] and in computer-integrated systems, in particular IoT systems [4-6] and smart home systems [7].

In this work, software was created to scan ports in the C# programming language. This uses the Microsoft Visual Studio development environment and Microsoft .NET software technology. C# together with Microsoft

.NET software technology allows to most efficiently and quickly develop software for Microsoft Windows operating systems.

The developed application allows to scan the network, get MAC-addresses of devices, scan popular or user-defined ports, store and analyze the received data.

Port scanning is a process that sends client requests to a range of server ports on the host to find the active port, can be used both to test system cybersecurity and to find vulnerabilities with subsequent cyberattack [1]. Administrators often use port scans to check the security policies of their networks. Hackers also use it to identify network services running on the host and search for vulnerabilities. There are two types of port scanning [1-3]:

Availability check. Before starting a comprehensive scan, it will be useful to make sure that the working device is located at the destination address. This task is solved by sending ICMP echo messages using the ping utility with a sequential search of all network IP-addresses. Analyzing traffic and tracking Echo messages sent over a short period of time to all hosts can detect scan attempts.

SYN scan. The port scanner generates IP-packets and monitors responses to them. This technique is called scanning with semi-open connections, because a full TCP/IP session is never fully opened. The port scanner generates a SYN packet. If the port on the destination host is open, the SYN-ACK packet will come from it. In response, the scanner sends an RST packet, which closes the connection before the session is complete.

Port scanners are one of the components of vulnerability scanners [2] – software or hardware for diagnosing and monitoring network computers, which allows to scan networks, computers and programs to identify possible security problems, assess and eliminate vulnerabilities.

The .NET platform and the C# programming language provide all the necessary capabilities to create applications that can interact over a network and use different network protocols [8].

In particular, in the .NET class system, the IP-address is represented by the IPAddress class. Parse() method of this class converts the string representation of the address to IPAddress.

The IPEndPoint class is used to obtain an address on the network. It contains information about a specific host computer. The HostName property returns this host-name, and the AddressList property returns all host IP-addresses, as one computer can have multiple IP-addresses on the network. The Dns class is used to interact with the DNS server and obtain the IP-address. To

obtain information about the host computer and its address, it has a method GetHostEntry().

Thus, the C# language contains ready-made tools for working with network devices, which greatly facilitates the creation of software for information security audit of computer networks and computer-integrated systems.

Main material

In this work researching the possibilities of the C# programming language for the development of software that analyzes information security in computer and computer-integrated systems. The purpose of the developing software is checking the server or host for availability on the network, checking its MAC-address and checking open and standard socket ports (port scanning).

The software for cybersecurity analysis of local networks consists of three blocks (Fig. 1), namely: the block of analysis of the local network, the block of analysis of ports of network devices and the block of work with databases and graphical interface.

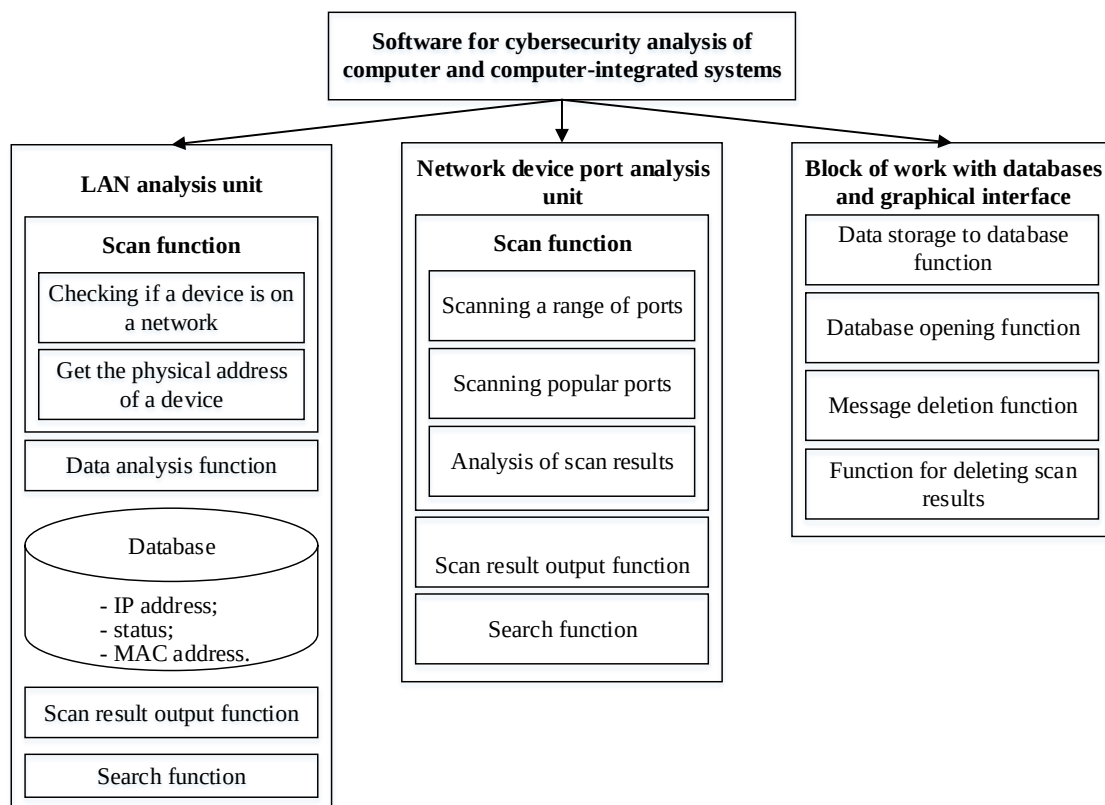


Fig. 1. Structural scheme of the developed software

SQLite is used to work with databases. The peculiarity of SQLite is that it does not use the client-server paradigm, i.e. the SQLite engine is not a separate process with which the application interacts, but provides a library with which the program is compiled and the engine becomes part of the program. Thus, SQLite library function calls (APIs) are used as an exchange protocol. This approach reduces overhead, response time and simplifies the program. SQLite stores the entire database (including definitions, tables, indexes, and data) in a single standard file on the computer on which the application is running. Ease of implementation is achieved due to the fact that

before the transaction, the entire file that stores the database is blocked; ACID functions are achieved in particular by creating a log file. Multiple processes or threads can read data from one database at the same time without any problems. An entry in the database can be made only if no other requests are currently being serviced; otherwise the write attempt fails and the error code is returned to the program. Due to the architecture of the SQLite engine, it can be used both on embedded systems and on dedicated machines with gigabyte data sets. A NetDevice class is used to represent the device on the network. Consider him implementation (Fig. 2):

```
// List of devices
List <NetDevice> devList = new List <NetDevice> ();

public class NetDevice {
private string ip;
    private string status;
private string mac;

// Initialization of properties by the constructor
public NetDevice (string [] row) {
ip = row [0];
status = row [1];
mac = row [2];
}

// Obtaining properties
public string [] GetInfo () {
return new string [] {ip, status, mac};
}
}
```

Fig. 2. Suggested source code of implementing a NetDevice class for representing a device of computer network

Each class object is a device on the network. It has three properties, namely: network address (ip), status, and physical address (mac). Also, each object has a method that allows to get its properties. All objects are stored in the devList. A Port class is used to represent the port. Consider its implementation (Fig. 3):

```
// List of ports
List <Port> portList = new List <Port> ();

public class Port {
private string port;
private string status;
private string description;

// Dictionary with the description of popular ports
Dictionary <int, string> commonports = new Dictionary <int, string> {
[20] = "File Transfer Protocol (FTP) Data Transfer",
[21] = "File Transfer Protocol (FTP) Command Control",
[22] = "Secure Shell (SSH) Secure Login",
[23] = "Telnet remote login service, unencrypted text messages",
[25] = "Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) E-mail routing",
[53] = "Domain Name System (DNS) service",
[80] = "Hypertext Transfer Protocol (HTTP) used in the World Wide Web",
[110] = "Post Office Protocol (POP3)",
[119] = "Network News Transfer Protocol (NNTP)",
[123] = "Network Time Protocol (NTP)",
[143] = "Internet Message Access Protocol (IMAP) Management of digital mail",
[161] = "Simple Network Management Protocol (SNMP)",
[194] = "Internet Relay Chat (IRC)",
[443] = "HTTP Secure (HTTPS) HTTP over TLS / SSL"
};

// Initialization of properties by the designer
public Port (string [] row) {
port = row [0];
status = row [1];
if (commonports.ContainsKey (Convert.ToInt32 (row [0])))
description = commonports [Convert.ToInt32 (row [0])];
}
else {
description = "None";
}
}

// Obtaining properties
public string [] GetInfo () {
return new string [] {port, status, description};
}
}
```

Fig. 3. Suggested source code of implementing a Port class to represent the port of a network device

Each this class object is a port. It has three properties, namely: port number, status, and description. The port description is added when the object is initialized automatically. A description of the most popular ports is

stored in the Commonports dictionary. Also, each object has a method that allows to get its properties. All objects are stored in the sorted portList.

As mentioned above, SQLite is used to work with databases. Consider the function where data is saved to the database (Fig. 4).

```
// Save the device list to the *.sqlite database file
private void saveAsToolStripMenuItem_Click (object sender, EventArgs e) {
// Generate a database file name using the current date and time
var time = DateTime.Now;
string formattedTime = time.ToString ("ddMMyyyy_hhmmss");

// Create a save file dialog
SaveFileDialog saveFile = new SaveFileDialog ();
saveFile.Title = "Save database as ...";
saveFile.FileName = "ScanResult_" + formattedTime + ".sqlite";
saveFile.Filter = "SQLite DB files (*.sqlite) | *.sqlite | All files (*.*) | *.*";
//saveFile.InitialDirectory = @"C:\\"; // Uncomment to use another default save dir, ie C:\
if (saveFile.ShowDialog () == DialogResult.OK) {
try {
// Create a database file
SQLiteConnection.CreateFile (saveFile.FileName);

// Create a connection
SQLiteConnection m_dbConnection;

// Connect to the database
m_dbConnection = new SQLiteConnection ("Data Source =" + saveFile.FileName + "; Version = 3;");
m_dbConnection.Open ();

// Create a table
string sql;
sql = "create table iplist (ip varchar (20), status varchar (5), mac varchar (30))";
SQLiteCommand command;
command = new SQLiteCommand (sql, m_dbConnection);
command.ExecuteNonQuery ();

// Write device list data to the database
foreach (var item in devList) {
command = new SQLiteCommand (m_dbConnection);
command.CommandText = "insert into iplist (ip, status, mac) values (@ip, @status, @mac)";
command.CommandType = CommandType.Text;
command.Parameters.Add (new SQLiteParameter ("@ ip", item.GetInfo ([0])));
command.Parameters.Add (new SQLiteParameter ("@ status", item.GetInfo ([1])));
command.Parameters.Add (new SQLiteParameter ("@ mac", item.GetInfo ([2])));
command.ExecuteNonQuery ();
}

// Close the database connection
m_dbConnection.Close ();

// Send a message to the user
writeMessage ("\r\nDatabase successfully saved.");
}
catch (Exception ex) {
MessageBox.Show (Error: Could not write file to disk. Original error: "+ ex.Message, " Error ");
}
}
}
```

Fig. 4. Suggested source code of implementing the function of saving scan results to a SQLite database

The table of the created database contains three columns, namely: “ip”, “status” and “mac”.

Consider the scanning function of the local network, which uses multithreading to increase the scanning speed (Fig. 5).

Multithreading is a property of an operating system or application that means that the process generated in the operating system can consist of several threads running in parallel or even simultaneously on multiprocessor systems. For some tasks, this separation can lead to more efficient use of computer resources. Such execution threads are also called streams.

The essence of multithreading is quasi-multitasking at the level of one executable process, i.e. all threads are executed in the address space of the process. In addition, all process threads have not only a common address space, but also common file descriptors. The process being performed has at least one (main) thread.

To implement multithreading, we use the Parallel.For loop built into Microsoft .NET software technology, which automatically creates the maximum number of threads to speed up certain actions.

The iphlapi.dll library is used to obtain the device's MAC-address (Fig. 6).


```

// Scan IP addresses async
private void scanIP () {
    string ipone = firstAddrOctetOneTextBox.Text + "." + firstAddrOctetTwoTextBox.Text + "." +
firstAddrOctetThreeTextBox.Text + "." + firstAddrOctetFourTextBox.Text;
    string iptwo = secondAddrOctetOneTextBox.Text + "." + secondAddrOctetTwoTextBox.Text + "." +
secondAddrOctetThreeTextBox.Text + "." + secondAddrOctetFourTextBox.Text;
    if (isValidIP (ipone) && isValidIP (iptwo) == true) {
        Invoke (new Action () => {
            // Notify user, that scanning process is starting
            writeMessage ("\ r \ nScanning LAN ...");
        });

        int start = BitConverter.ToInt32 [new byte[]
Convert.ToByte (firstAddrOctetFourTextBox.Text),
Convert.ToByte (firstAddrOctetThreeTextBox.Text),
Convert.ToByte (firstAddrOctetTwoTextBox.Text),
Convert.ToByte (firstAddrOctetOneTextBox.Text)
], 0);

        int end = BitConverter.ToInt32 [new byte[]
Convert.ToByte (secondAddrOctetFourTextBox.Text),
Convert.ToByte (secondAddrOctetThreeTextBox.Text),
Convert.ToByte (secondAddrOctetTwoTextBox.Text),
Convert.ToByte (secondAddrOctetOneTextBox.Text)
], 0);

        // Create and fill list of IP addresses
        List <IPAddress> addresses = new List <IPAddress> ();
        for (int i = start; i <= end; i++) {
            byte [] bytes = BitConverter.GetBytes (i);
            addresses.Add (new IPAddress (new [] {bytes [3], bytes [2], bytes [1], bytes [0]}));
        }

        // Multithreading LAN scan
        Parallel.For (0, addresses.Count, new ParallelOptions (), (i, state) => {
            System.Net.NetworkInformation.Ping p = new System.Net.NetworkInformation.Ping ();
            System.Net.NetworkInformation.PingReply rep = p.Send (addresses [i].ToString (), 100);
            if (rep.Status == System.Net.NetworkInformation.IPStatus.Success) {
                NetDevice device = new NetDevice (new string [] {addresses [i].ToString (), "online", getMAC
(addresses [i].ToString ())});
                devList.Add (device);
            }
            else {
                if (showAllChkBox.Checked == true) {
                    // Creating new device
                    NetDevice device = new NetDevice (new string [] {addresses [i].ToString (), "offline", "none"});

                    // Adding new device to list
                    devList.Add (device);
                }
            }
        });

        Invoke (new Action () => {
            // Fill listView
            fillListView ();

            // Notify user, that scanning process is done
            writeMessage ("Done.");
        });
    }
    else {
        MessageBox.Show ("Error: Invalild IP address.", "Error");
    }
}

```

Fig. 5. Suggested source code of the implementation of the LAN scanning function, which uses multithreading to increase the scanning speed

This function by sending an ARP request to the appropriate IP-address allows to get its physical address – MAC-address. MAC Address is a communication protocol designed to convert IP-addresses to MAC-addresses on TCP/IP networks.

Developed application allows to scan the network, obtain MAC-addresses of devices, scan popular or user-defined ports, store and analyze the received data.

Consider in more detail the interface of the developed application. The interface consists of two tabs – “LAN Scan” and “Port Scan”, a text box in which user messages, analysis results and user menus are displayed.

The tab “LAN Scan” (Fig. 7) consists of the table, eight input fields for four octets of the initial and final IP-address, respectively, input fields for search, one option (checkbox) and three buttons.

```
// Used this library to get the MAC address
[DllImport("iphlpapi.dll", ExactSpelling = true)]
public static extern int SendARP (int destIP, int srcIP, byte [] macAddr, ref uint physicalAddrLen);

// Sent ARP to obtain MAC address by IP-address
private string getMAC (string ip) {
    IPAddress dst = IPAddress.Parse (ip); // IP-address to scan

    byte [] macAddr = new byte [6];
    uint macAddrLen = (uint) macAddr.Length;

    if (SendARP (BitConverter.ToInt32 (dst.GetAddressBytes (), 0), 0, macAddr, ref macAddrLen) != 0) {
        throw new InvalidOperationException ("SendARP failed.");
    }

    string [] str = new string [(int) macAddrLen];
    for (int i = 0; i < macAddrLen; i++) {
        str [i] = macAddr [i].ToString ("x2");
    }

    return string.Join (":", p.);
}
```

Fig. 6. Suggested source code of implementing the function of obtaining the MAC-address of devices using the library iphlapi.dll

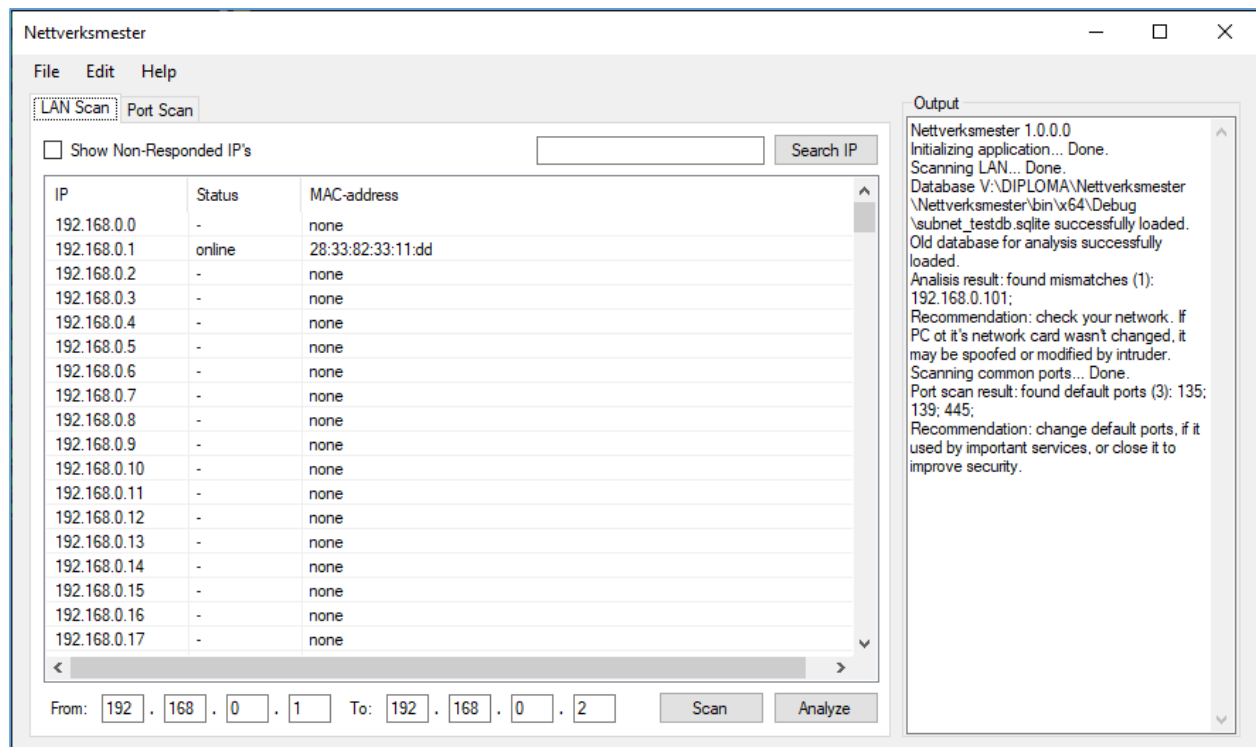


Fig. 7. Application interface. The tab “LAN Scan”

The button “Scan” scans the network and displays the result in the table (Fig. 7).

The result of the scan is a list of IP-addresses with their status (whether the device is located at the address), and MAC device addresses, if available on the network.

The button “Analyze” analyzes the network and reports whether a device has been modified or replaced by an attacker.

The button “Search IP” allows to search for the device by its address.

It will be displayed in the table (Fig. 8). Option “Show Non-Responded IP’s” allows to hide or show IP-

addresses that do not belong to any device.

The tab “Scan Port” (Fig. 9) consists of the table, two input fields of the port range for custom scan mode, four input fields for four octets IP-addresses of the device whose ports to be scanned, search input fields, drop-down menu and two buttons.

The drop-down menu (Fig. 10) allows the user to select the scan mode: scan popular ports, or scan a range of ports (all default ports).

The range of ports to be scanned can be set by the user. The button “Scan” scans the ports and displays the result in the table (Fig. 9).

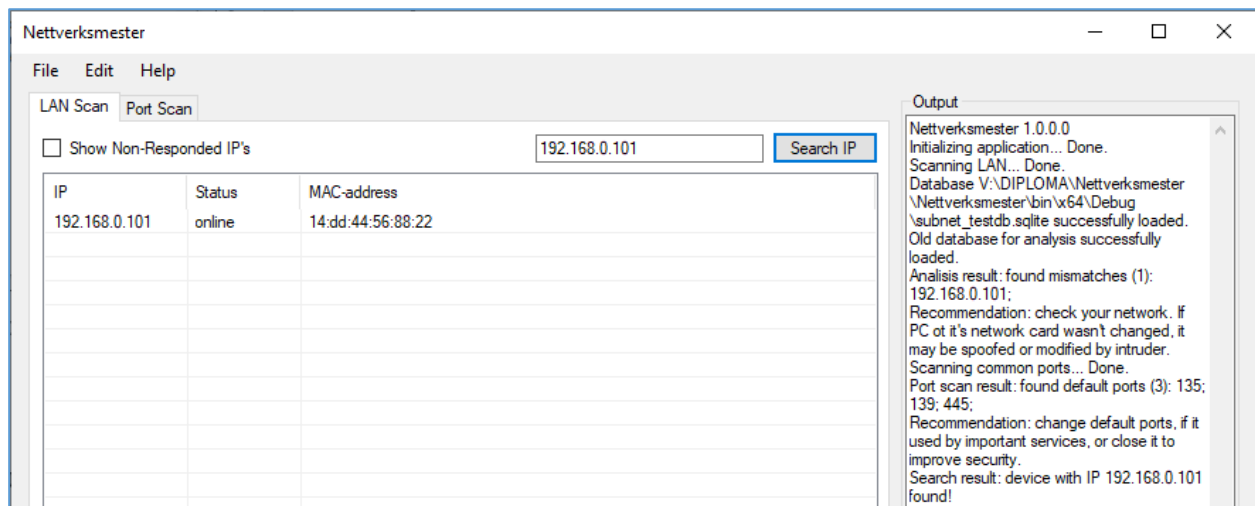


Fig. 8. The tab “LAN Scan”. Search for a device on the network and messages

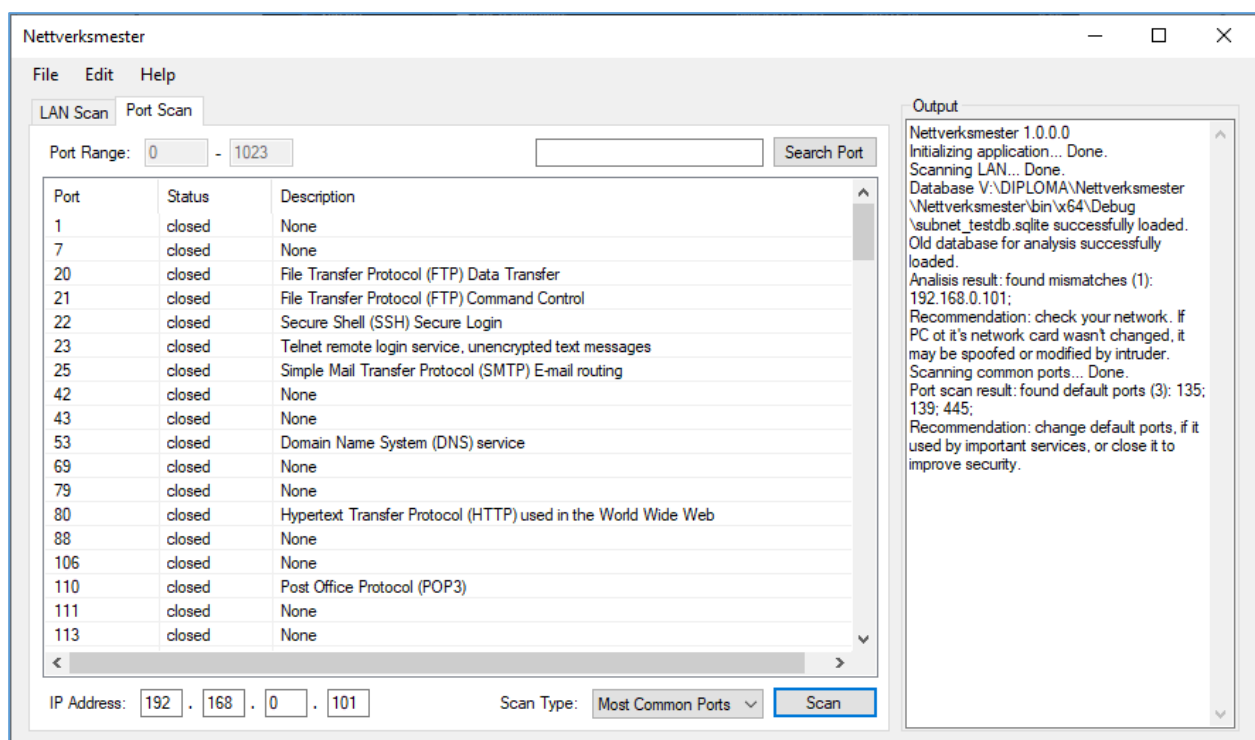


Fig. 9. Application interface. The tab “Port Scan”

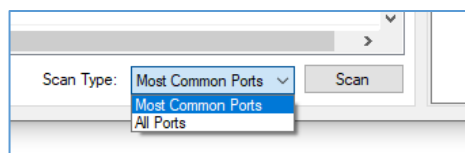


Fig. 10. The tab “Port Scan”. Drop-down menu

The result of the scan is a list of ports with their status (open or closed), and a description of the port, if it is popular and used by a particular service.

The button “Search Port” allows to search for a port by its number. It will be displayed in the table (Fig. 11).

Thus by means of the C# programming language managed to create port scanner for cybersecurity audit of computer and computer-integrated systems.

Conclusions

In this paper, the possibilities and advantages of the C# programming language for the development of cybersecurity analysis software in computer and computer-integrated systems were researched.

In the course of work the software which analyzes is developed information security in local computer networks and computer-integrated systems. This software can be used for educational purposes in learning the C# programming language and cybersecurity of computer systems.

The developed software has the potential to be further improved and applied in various fields to test the cybersecurity of local computer networks and computer-integrated technologies.

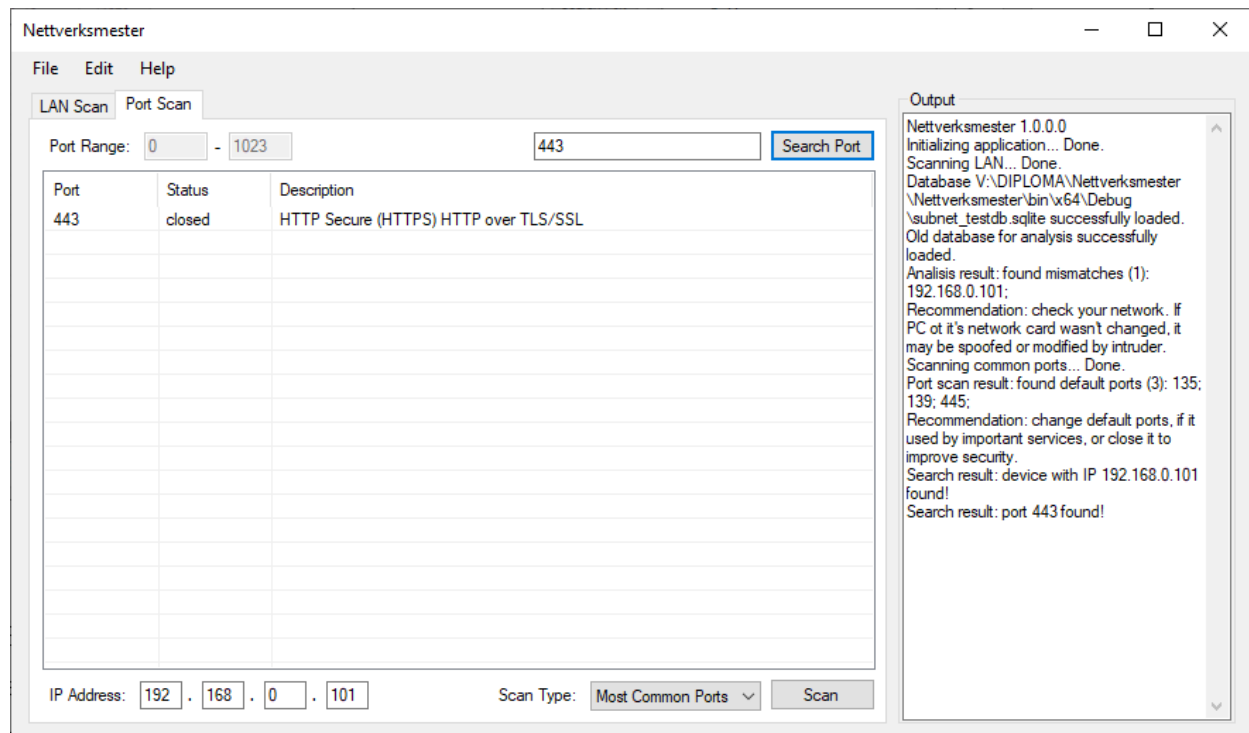


Fig. 11. The tab “Port Scan”. P3zort search and location notification

REFERENCES

- Shirey R. (2000), “RFC 2828 Internet Security Glossary”, *Internet Engineering Task Force*, available at: <https://data-tracker.ietf.org/doc/html/rfc2828>.
- Poddubnyi V., Sievierinov O., Pustomelnik O. (2020), “Vulnerability management as an integral part of its security policy”, *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, Vol. 4 (62), Poltava, pp. 55-58, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.4.055> (in Ukrainian)
- Mohammed M. O. (2020), “Automatic Port Scanner”, *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Vol. 5(9), pp. 711-717, DOI: <https://doi.org/10.38124/IJISRT20SEP503>.
- Verma S., Kawamoto Y., Kato N. (2021) “A Smart Internet-wide Port Scan Approach for Improving IoT Security under Dynamic WLAN Environments”, in *IEEE Internet of Things Journal*, DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3132389>.
- Verma S., Kawamoto Y., Kato N. (2021) “A Network-Aware Internet-Wide Scan for Security Maximization of IPv6-Enabled WLAN IoT Devices”, in *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, No. 10, pp. 8411-8422, DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3045733>.
- Markowsky L., Markowsky G. (2015) “Scanning for vulnerable devices in the Internet of Things”, 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), pp. 463-467, DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2015.7340779>.
- Bastos D., Shackleton M., El-Moussa F. (2018), “Internet of Things: A Survey of Technologies and Security Risks in Smart Home and City Environments”, *Living in the Internet of Things: Cybersecurity of the IoT – 2018*, DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2018.0030>.
- Microsoft (2022), “C# documentation”, Official website Microsoft Corporation, available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp>.

Received (Надійшла) 21.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.05.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Пашинських Владислав Вадимович – магістр з комп’ютерної інженерії, кафедра кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Vladyslav Pashynskykh – Master of Science in Computer Engineering, Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

e-mail: vlad.pashynskykh@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7298-7946>.

Мелешко Єлизавета Владиславівна – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Yelyzaveta Meleshko – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Associate Professor of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

e-mail: elismelashko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-0063>.

Якименко Микола Сергійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри вищої математики та фізики, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Mykola Yakymenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of Higher Mathematics and Physics Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: m.yakymenko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3290-6088>.

Башченко Дмитро В'ячеславович – аспірант кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Dmytro Bashchenko – Postgraduate student of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: bashchenko.dv@meta.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4561-0016>.

Ткачук Роман Олегович – аспірант кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Roman Tkachuk – Postgraduate student of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: tkachuk@outlook.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1984-0419>.

Дослідження можливостей мови програмування C# для створення програмного забезпечення аналізу кібербезпеки в комп'ютерних мережах та комп'ютерно-інтегрованих системах

В. В. Пашинських, Є. В. Мелешко, М. С. Якименко, Д. В. Башченко, Р. О. Ткачук

Анотація. Об'єктом вивчення у статті є засоби та можливості мови програмування C# для реалізації програмного забезпечення аналізу кібербезпеки у локальних комп'ютерних мережах та комп'ютерно-інтегрованих системах. Актуальність дослідження зумовлена важливістю забезпечення інформаційної безпеки комп'ютерних та комп'ютерно-інтегрованих систем у державних органах, військово-промислового комплексу, приватному бізнесі тощо, та важливістю під час підготовки фахівців з кібербезпеки у вищих навчальних закладах розгляду навчальних прикладів на популярних мовах програмування. **Метою** роботи є дослідження можливостей мови програмування C# для розробки програмного забезпечення, яке аналізує безпеку у локальних комп'ютерних мережах та комп'ютерно-інтегрованих системах. **Завдання:** розробити програмне забезпечення для сканування портів мережевих пристроїв у комп'ютерних мережах та комп'ютерно-інтегрованих системах для аудиту інформаційної безпеки, використовуючи засоби та бібліотеки мови програмування C#, дослідити переваги та можливості використання саме цієї мови програмування для даної задачі. **Методи досліджень:** теорія комп'ютерних мереж, об'єктно-орієнтоване програмування, теорія алгоритмів та структур даних, теорія тестування програмного забезпечення. **Висновки.** У цій роботі було досліджено можливості та переваги мови програмування C# для розробки програмного забезпечення з аналізу кібербезпеки комп'ютерних та комп'ютерно-інтегрованих систем. У ході роботи розроблено програмне забезпечення, яке аналізує інформаційну безпеку у локальних комп'ютерних мережах та комп'ютерно-інтегрованих системах. Дане програмне забезпечення можна використовувати у навчальних цілях при вивченні мови програмування C# та кібербезпеки комп'ютерних систем. Розроблене програмне забезпечення має потенційну можливість для подальшого вдосконалення і застосування у різних галузях для перевірки кібербезпеки локальних комп'ютерних мереж та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Ключові слова: мова програмування; C#; кібербезпека; аналіз вразливостей; сканер портів; сканер вразливостей; комп'ютерні системи; комп'ютерно-інтегровані системи; комп'ютерні мережі; інформаційні атаки; аудит інформаційної безпеки.

Исследование возможностей языка программирования C# для создания программного обеспечения анализа кибербезопасности в компьютерных сетях и компьютерно-интегрированных системах

В. В. Пашинских, Е. В. Мелешко, Н. С. Якименко, Д. В. Башченко, Р. О. Ткачук

Аннотация. Объектом изучения статьи являются средства и возможности языка программирования C# для реализации программного обеспечения анализа кибербезопасности в локальных компьютерных сетях и компьютерно-интегрированных системах. **Актуальность исследования** обусловлена важностью обеспечения информационной безопасности компьютерных и компьютерно-интегрированных систем в государственных органах, военно-промышленном комплексе, частном бизнесе и т.д., и важностью при подготовке специалистов по кибербезопасности в высших учебных заведениях рассмотрения учебных примеров на популярных языках программирования. **Целью работы** является исследование возможностей языка программирования C# для разработки программного обеспечения, анализирующего безопасность в локальных компьютерных сетях и компьютерно-интегрированных системах. **Задача:** разработать программное обеспечение для сканирования портов сетевых устройств в компьютерных сетях и компьютерно-интегрированных системах для аудита информационной безопасности, используя средства и библиотеки языка программирования C#, исследовать преимущества и возможности использования этого языка программирования для данной задачи. **Методы исследований:** теория компьютерных сетей, объектно-ориентированное программирование, теория алгоритмов и структур данных, теория тестирования программного обеспечения. **Выводы.** В этой работе были исследованы возможности и преимущества языка программирования C# для разработки программного обеспечения анализа кибербезопасности компьютерных и компьютерно-интегрированных систем. В ходе работы разработано программное обеспечение, анализирующее информационную безопасность в локальных компьютерных сетях и компьютерно-интегрированных системах. Данное программное обеспечение можно использовать в обучающих целях при изучении языка программирования C# и кибербезопасности компьютерных систем. Разработанное программное обеспечение имеет потенциальную возможность для дальнейшего совершенствования и применения в различных отраслях для проверки кибербезопасности локальных сетей и компьютерно-интегрированных технологий.

Ключевые слова: язык программирования; C#; кибербезопасность; анализ уязвимостей; сканер портов; сканер уязвимостей; компьютерные системы; компьютерно-интегрированные системы; компьютерные сети; информационные атаки; аудит информационной безопасности.

Serhii Pohasii¹, Stanislav Milevskyi¹, Bohdan Tomashevsky², Natalya Voropay¹

¹ National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine

² Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE DOUBLE-CONTOUR PROTECTION CONCEPT IN SOCIO-CYBERPHYSICAL SYSTEMS

Abstract. The rapid development of mobile Internet technologies LTE (Long-Term Evolution) not only predetermined the further development of cyber-physical systems, which are based on the synthesis of technologies of classical computer systems and LTE technologies, as well as integration with Internet-of-Things technologies. As a result, the emergence of sociocyberphysical systems predetermines further development based on this integration. The creation of mesh- and sensor networks also allows the development of smart technologies and systems based on their conglomeration. The development and creation of a quantum computer, on the one hand, will make it possible to make a technical breakthrough in computing resources, use artificial intelligence, and on the other hand, it can lead to “chaos” in ensuring the security of modern technologies and systems. So, based on the algorithms of Shor and Grover quantum cryptography, symmetric cryptosystems based on traditional cryptography algorithms, as well as asymmetric cryptosystems, including systems based on elliptic curve cryptography, can be broken. The paper proposes to use a new approach to building security systems based on the concept of internal and external security contours. At the same time, security contours of continuous business processes are considered. This approach provides an objective assessment of the current state of security of the socio-cyber system as a whole.

Keywords: double-contour Security concept; post-quantum period; quantum computer; synergy; hybridity of cyberattacks.

Introduction

Problem statement. The development of modern LTE mobile Internet technologies makes it possible to use modern standards of wireless networks IEEE802.16, IEEE802.16e, IEEE802.15.4, IEEE802.11, Bluetooth 5, 6 to form not only mesh and sensor networks, but also integration with cyber-physical systems based on smart and Internet of things technologies. This approach allows the formation of sociocyberphysical systems (cyberphysical social system, CPSS) – a set of subjects and objects of the cybernetic, physical and social worlds that allow the formation of “smart” communities, on the one hand, and intellectual space, on the other. In CPSS, users are service consumers, and physical objects in the form of various devices are service providers. [1, 2].

Analysis of recent research and publications. In the context of the formation of a high-tech society, social networks based on Internet services have become one of the most effective and popular means of mass communication. One of the directions of development of CPSS is the impact on such communities, which are an effective mechanism of influence in the context of hybrid wars and color revolutions [1, 2]. Such a synthesis of social Internet services (SSIS) with cyber-physical systems makes it possible to form a sociocyberphysical system [2–7]. CPSS allows to form the social, political, economic “opinion” of the intellectual community (integration of the cybernetic, physical and social worlds), regulate and manage on the basis of SSIS, provide users with proactive services. The nature of CPSS data brings new requirements and challenges to the various stages of data processing, including the identification of data sources, the processing and aggregation of data of various types and scales. Another direction is the integration of cyberphysical systems with new technologies of wireless networks based on a mobile Internet resource. This approach forms not only the

directions of high-performance sociocyberphysical systems based on smart technologies, but also makes it possible to significantly simplify the possibility of implementing targeted attacks based on the integration of cyber threats with social engineering methods [2, 8–10]. In addition, in the context of the emergence of a full-scale quantum computer, the stability of almost all algorithms of symmetric and asymmetric cryptography is called into question, and the rapid growth of IT computing resources and “G” technologies contributes to an increase in the growth of attacks on information and communication (ICS) and cyberphysical systems (CPS), which are the core of modern information-critical cybernetic systems (CCIS). Under such conditions, the primary task of maintaining the required level of security is the classification of modern threats that are combined with social engineering methods and acquire signs of synergy and hybridity [8–10]. The performed analysis [11–16] showed a change in the emphasis of CCIS (CPSS) from the development of an optimization problem for these computational components to the involved interaction between the physical environments and the computational elements with which they interact. In [11], a classification is proposed, consisting of four dimensions, which allows to combine the issues of building and modifying ICS with ensuring the required level of security. The first dimension of the classification covers the attack vector and the main attack scenario. The second dimension of classification identifies an attack by its primary target. Vulnerabilities are classified in the third dimension of the classification, and payloads in the fourth taxonomy. Paper [13] presents an information security risk analysis methodology that links assets, vulnerabilities, threats, and organizational controls. This approach allows to identify critical points in the network infrastructure, combine them with the appropriate elements of the control system. The approach uses a sequence of matrices that reflect the correlation of various elements in risk analysis [13].

In addition, [14] provides an example of how the organization of the process of collecting information about cyber incidents can be used by victims of cyber attacks. In addition, an attempt is made to assist in understanding the threat of cyber incidents for various purposes, which can be useful for increasing organizational focus in terms of a cyber incident. In [15–16], a classification is proposed, in which the following classes of entities are distinguished: an attacker, a vulnerability, a tool, a goal, an action, goals and an unauthorized result. Attackers use tools to perform actions that exploit a vulnerability in a target.

In addition, the direction of smart technologies and "Smart Home" technologies usually use security mechanisms without a preliminary integrated approach in the provision of security services. Basically, the mechanisms of computer systems and technologies are integrated with wireless network technologies, which does not allow the formation of information protection systems with the required level of security. The papers [17–24] consider the main approaches to ensuring security in cyber-physical systems and smart technologies. As a rule, the KNX standard (ISO/IEC 14543) is used, which provides security services – confidentiality and data integrity. Fig. 1 presents the basic principles of security based on the use of the KNX standard.

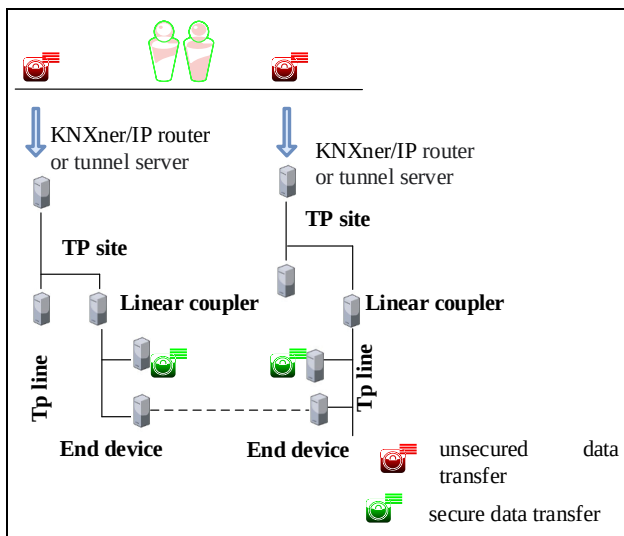


Fig. 1. Ensuring security in mobile wireless channels based on KNX

The KNX IP Secure standard allows to authenticate and encrypt KNX telegrams in IP networks. In this case, tunneling is usually formed, which ensures the confidentiality of information. KNX IP Secure mechanisms are an additional security shell (shell) that protects all KNXnet/IP data traffic.

However, KNX IP Secure is not so secure, it is possible to monitor the network, record sent packets and easily repeat them, because there are no line connectors with the "Security Proxy" function. In addition, the use of the AES-128 algorithm in the formation of tunneling in the post-quantum period will not provide the required level of protection even for the inner contour.

However, a significant drawback of this approach is the lack of an objective assessment of the current state

of system security. As a rule, such systems are built from two main subsystems – cyberphysical, which directly performs the functions of service, and socio-management – a combination of a social component and a control system that is deployed in the cloud. The use of security mechanisms of the second subsystem, as a rule, is not taken into account when assessing the current state of security. Formally, "it is considered" that cloud technologies provide the required level of security. The main security threats in the cloud are: data theft, data loss, account hacking, gaps in interfaces and Application Programming Interface (API), DDos attacks, insider actions, the possibility of penetration by hackers, as well as downtime due to the fault of the provider [25].

Thus, there is a need to form a CPSS security approach based on the integration of threats, and the formation of a dual-contour security concept, which will ensure the objectivity of assessing not only the current state of information security of such systems, but also identify signs of synergy and hybridity of targeted attacks on such systems.

The goal of the article is to develop the concept of dual-contour protection of sociocyberphysical systems, which will allow forming a new approach to assessing the CPSS information security system, taking into account its scalability and integration of various technologies of wireless communication channels.

1. Development of the security concept for wireless networks based on mobile technologies

To ensure the security of sociocyberphysical systems and systems based on their infrastructure, it is necessary to take into account not only the rapid development of the computing capabilities of mobile technologies (wireless communication channels) with their ability to provide information transfer from 1 Tb/s and above, the growth of service capabilities and functionality of cloud technologies, but also the integration of modern threats based on the synthesis of social engineering mechanisms, cyber threats (with signs of hybridity and synergy), as well as the ability of special services to control a significant part of cloud technology resources. To implement this approach, it is proposed to divide CPSS into two subsystems of security and infrastructure – the inner contour, the cyber-physical system (cyber-physical system, CPS), which provides the required set of services and functionality, and the outer contour – the socio-managerial system (socio-managerial system, SMS) based on the synthesis of social networks and systems (messengers) of cloud technologies.

This approach provides a synthesis of internal and external contours, takes into account efficiency, energy intensity and relative safety (each contour builds security on its own mechanisms and principles), on the one hand. On the other hand, it allows to objectively assess the threats of each of the contours, taking into account the computing resources and financial capabilities of intruders. Fig. 2 presents a block diagram of the concept of dual-contour security of sociocyberphysical systems.

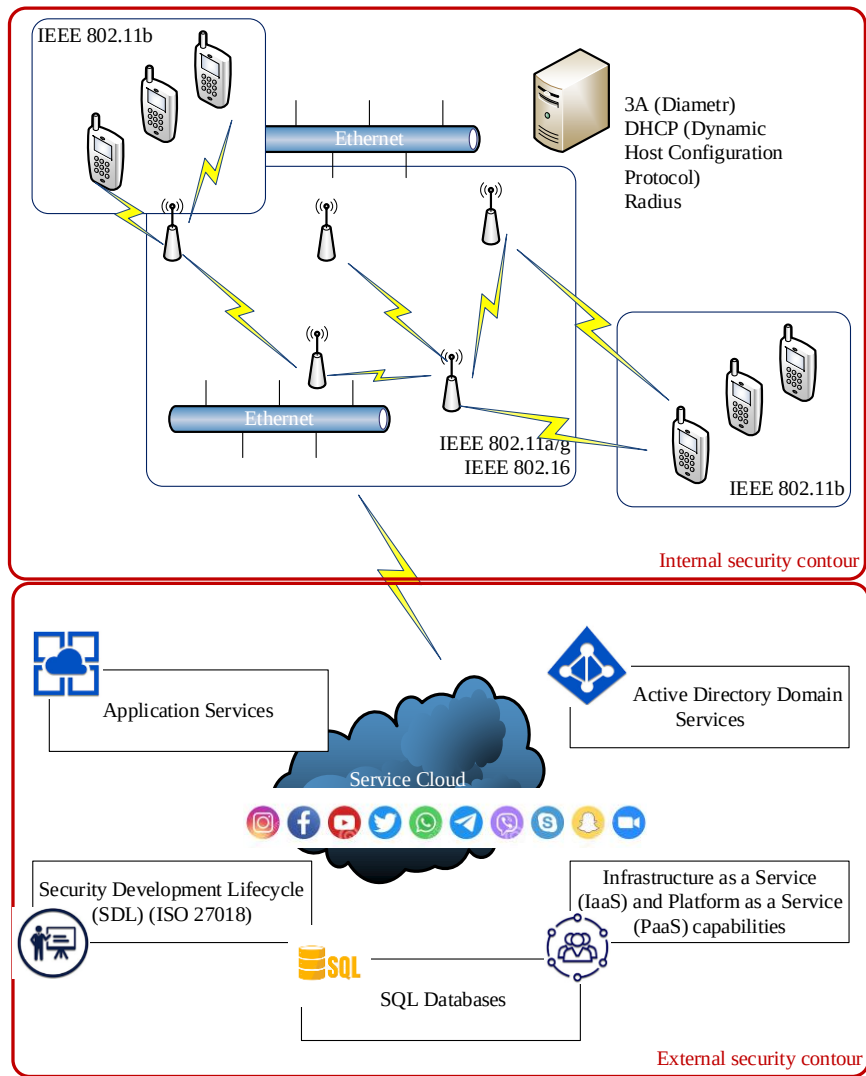


Fig. 2. Block diagram of the concept of dual-contour security of sociocyberphysical systems

To ensure the security of such systems, two classes of threats must be considered. The first class is threats and their integration with the methods of social engineering of the internal infrastructure (internal security contour). The second class is threats of the external contour (cloud technologies that provide not only the management of sociocyberphysical systems and networks, but also the storage/duplication of the database).

The works [10, 26] propose methodological foundations for building security systems, taking into account the synergy and hybridity of modern targeted attacks on critical infrastructure objects, which makes it possible to ensure security in the inner contour.

To ensure the safety of the entire protection system, it is necessary to take into account the threats of the internal and external contours:

– internal contour threats considering hybridity and synergism [26]:

$$W_{hybrid\ C,I,A,Au,Af\ synerg}^{CPSS\ ISL} = W_{synerg}^{CPSS\ ISLC} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ISLI} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ISLA} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ISLAu} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ISLInv}, \quad (1)$$

where $W_{synerg}^{CPSS\ ISLC}$ – synergy of threats on confidentiality service, $W_{synerg}^{CPSS\ ISLI}$ – synergy of threats on integrity service, $W_{synerg}^{CPSS\ ISLA}$ – synergy of threats on availability service, $W_{synerg}^{CPSS\ ISLAu}$ – synergy of threats to the authenticity service, $W_{synerg}^{CPSS\ ISLInv}$ – synergy of threats to involvement service.

– outer contour threats considering hybridity and synergism [26]:

$$W_{hybrid\ C,I,A,Au,Af\ synerg}^{SCPS\ ESL} = W_{synerg}^{CPSS\ ESLC} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ESLI} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ESLA} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ESLAu} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ESLInv}, \quad (2)$$

where $W_{synerg}^{CPSS\ ESLC}$ – synergy of threats on confidentiality service, $W_{synerg}^{CPSS\ ESLI}$ – synergy of threats on integrity service, $W_{synerg}^{CPSS\ ESLA}$ – synergy of threats on availability service, $W_{synerg}^{CPSS\ ESLAu}$ – synergy

of threats to the authenticity service, $W_{hybrid\ C,I,A,Au,Af\ synerg}^{CPSS\ ESLInv}$ – synergy of threats to involvement service.

The analysis [10, 25, 26] showed that in the outer contour the main security services are integrity, confidentiality and availability, so the services of authenticity and involvement can be neglected. Then the threats of the outer contour can be written in the form:

$$W_{hybrid\ C,I,A,Au,Af\ synerg}^{CPSS\ ESL} = W_{synerg}^{CPSS\ ESLC} \cap \cap W_{synerg}^{CPSS\ ESLI} \cap W_{synerg}^{CPSS\ ESLA}, \quad (3)$$

Each element of information resources $I_{A_i} \in \{I_A\}$ can be described by a vector

$$I_{A_i} = (Type_i, A_i^C, A_i^I, A_i^A, A_i^{Au}, A_i^{Inv}, \beta_i),$$

where $Type_i$ – information asset type, described by a set of basic values: $Type_i = \{CI_i, PD_i, CD_i, TS_i, StR_i, PubI_i, ContI_i, PI_i\}$, where CI_i – confidential information, PD_i – payment documents, CD_i – loan documents, TS_i – commercial secret, StR_i – statistical reports, $PubI_i$ – public information, $ContI_i$ – control information, PI_i – personal Information. $A_i^C, A_i^I, A_i^A, A_i^{Au}, A_i^{Inv}$ – security services (A_i^C – confidentiality, A_i^I – integrity, A_i^A – availability, A_i^{Au} – authenticity, A_i^{Inv} – involvement); β_i – a metric of the ratio of time and degree of confidentiality of information for an asset (critical – 1,0; high – 0,75; medium – 0,5; low – 0,25; very low – 0,01).

Then the general (current) level of security of sociocyberphysical systems based on wireless mobile technologies is described by the expression [26]:

– for additive convolution

$$L_{W_{security}^{CPSS}} = \sum_{W_{hybrid\ C,I,A,Au,Af\ synerg}^{CPSS\ ISL}} \sum_{i=1}^8 (I_{A_i} \times \beta_i) + \sum_{W_{hybrid\ C,I,A,Au,Af\ synerg}^{CPSS\ ESL}} \sum_{i=1}^8 (I_{A_i} \times \beta_i); \quad (4)$$

– for multiplicative convolution

$$L_{W_{security}^{CPSS}} = 1 - \left[1 - \sum_{W_{hybrid\ C,I,A,Au,Af\ synerg}^{CPSS\ ISL}} \sum_{i=1}^8 (I_{A_i} \times \beta_i) \right] \times \left[1 - \sum_{W_{hybrid\ C,I,A,Au,Af\ synerg}^{CPSS\ ESL}} \sum_{i=1}^8 (I_{A_i} \times \beta_i) \right]. \quad (5)$$

In (4), (5) index i refers to the corresponding type of information asset, and external summation is performed over all threats of the internal and external contours.

Thus, the proposed concept takes into account the level of security not only of the CPS, which directly provides services for the operation of smart and Internet of things systems, but also of the SMS, which directly provides the subsystem of the internal security contour.

2. Wireless network security assessment based on the dual-contour security concept

To determine the current security state of the inner contour, we use the approach proposed in [9], the main difference is the expert assessment of the distribution of threats, taking into account their hybridity and synergy based on a synergistic threat model. The main stages are shown in Fig. 3.

To form an expert assessment, we use a modification of the threat classifier, which is proposed in [8, 9] and shown in Fig. 4. For the objectivity of expert judgments, we use the weight coefficients of expert competence (k_k), presented in Tabl. 1.

Table 1 – Expert competence weight coefficient

№	Expert qualification	Weight value (k_k)
1	International expert in the field of IS, CS, SI	1,0
2	National expert in the field of IS, CS, SI	0,95
3	Certified international specialist in the field of IS, CS, SI	0,9
4	Full doctorate in the field of IS, CS, SI	0,9
5	Head of security	0,85
6	Phd in the field of IS, CS, SI	0,8
7	Security officer	0,7
8	System administrator	0,6
9	Security engineer	0,5
10	Postgraduate student in the specialty in the field of IS, CS, SI	0,4

Summary score of i -th threat is determined by the number of experts according to the expression:

$$x_i = \sum_{k=1}^K x_k \times k_k / K, \quad (6)$$

where x_k – evaluation of k -th expert for i -th threat influence; k_k – expert competence level; K – number of experts.

A measure of the consistency of expert assessments is the dispersion, which is determined by the expression:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K k_k (x_k - x_i)^2. \quad (7)$$

Statistical probability of the received results $1 - \alpha_i$, will be: $[x_i - \Delta, x_i + \Delta]$, where value x_i distributed according to the normal law with the center in x_i and dispersion σ_x^2 . Then Δ is determined by the expression:

$$\Delta = t \sqrt{\sigma_x^2 / N}, \quad (8)$$

where t – Student's t-distribution value for $K-1$ degrees of freedom.

To determine the economic costs of preventing an attack, we use an algorithm based on the cost indicators of threats. This approach makes it possible to estimate the economic costs of deliberate protection

mechanisms, taking into account the ranking of potential threats and the importance of information resources to be protected [8]. Both sides of the attack are determined by the importance (ranking) of attacks that are economically feasible to carry out.

1-st step. Identification of attacks, the effect of which exceeds the cost of their implementation:

$$Tr_R^A = \{Tr_i \mid (P_i^A - C_i^A) > 0\} \forall Tr_i \in Tr, \quad (9)$$

where Tr_R^A – set of potential threats, the implementation of which is effective for the attacker; Tr_i – threat for the i -th information resource; P_i^A – assessment of the cost of successful implementation of an attack on i -th resource from the side of the attacker; C_i^A – the cost of attacking the i -th resource from the side of the attacker.

2-nd step. Determination of the direction of protection, which provides an effect higher than the cost of their provision.

$$Tr_C^D = \{Tr_j \mid (P_i^D - C_i^D) > 0\} \forall Tr_j \in Tr, \quad (10)$$

where Tr_C^D – set of threats against which it is economically feasible to build protection; P_i^D – estimate of the cost of i -th information resource loss for the defending side; C_i^D – protection cost for i -th information resource for the defense side;

3-th step. Determination of importance coefficients for attackers. Defined as the share of winnings from the total winnings, which can potentially be obtained from the implementation of the entire complex of attackers' threats:

$$K_i^A = \frac{P_i^A - C_i^A}{\sum_{i=1}^M (P_i^A - C_i^A)}, \quad \forall Tr_i \in Tr_R^A, M = |Tr_R^A|, \quad (11)$$

where K_i^A – rating coefficient (importance) of the threat realization for i -th information resource;

M – the power of the set of selected potentially effective threats for the attacking side.

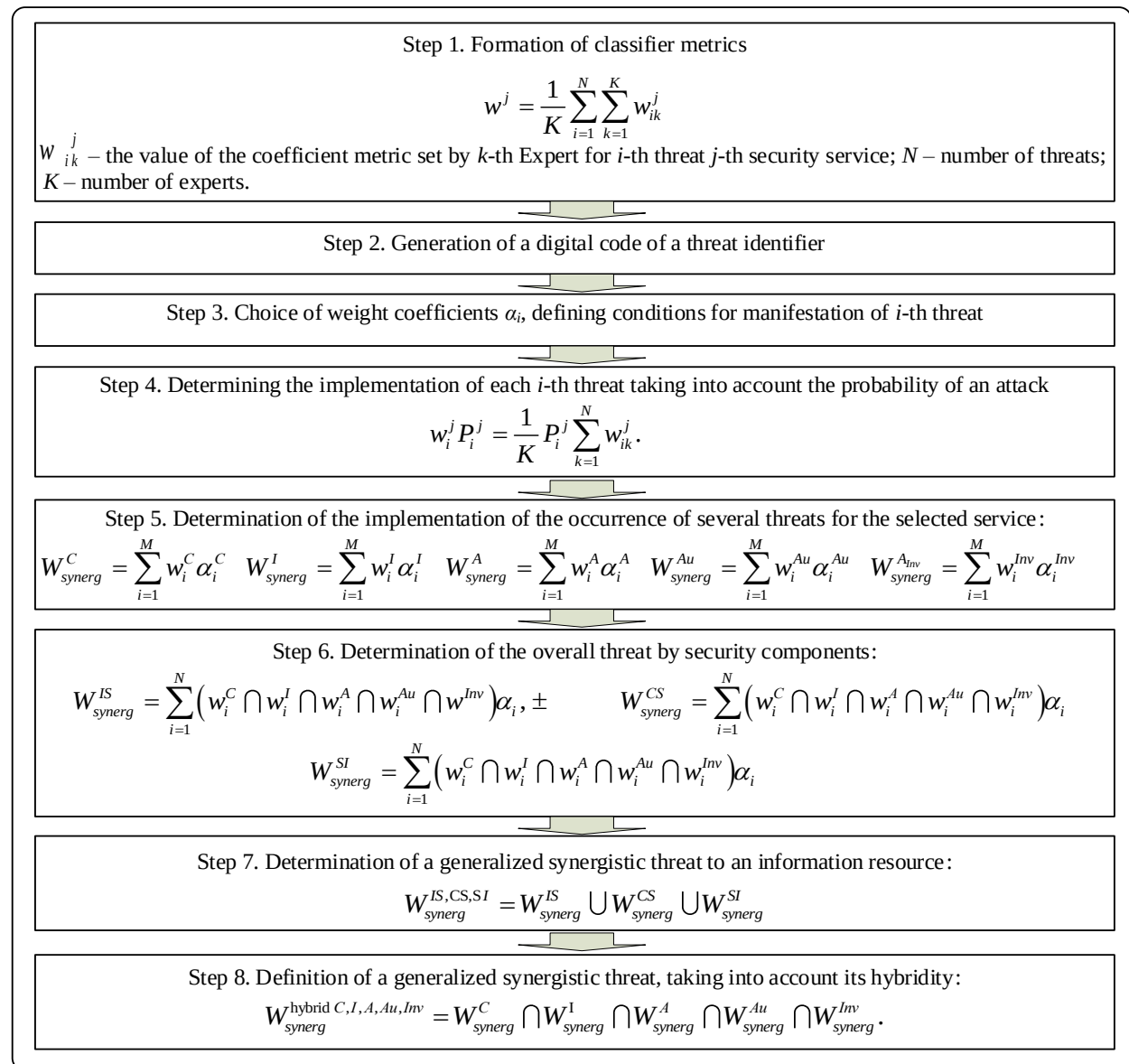


Fig. 3. Determining the probability of threats based on the synergistic threat model

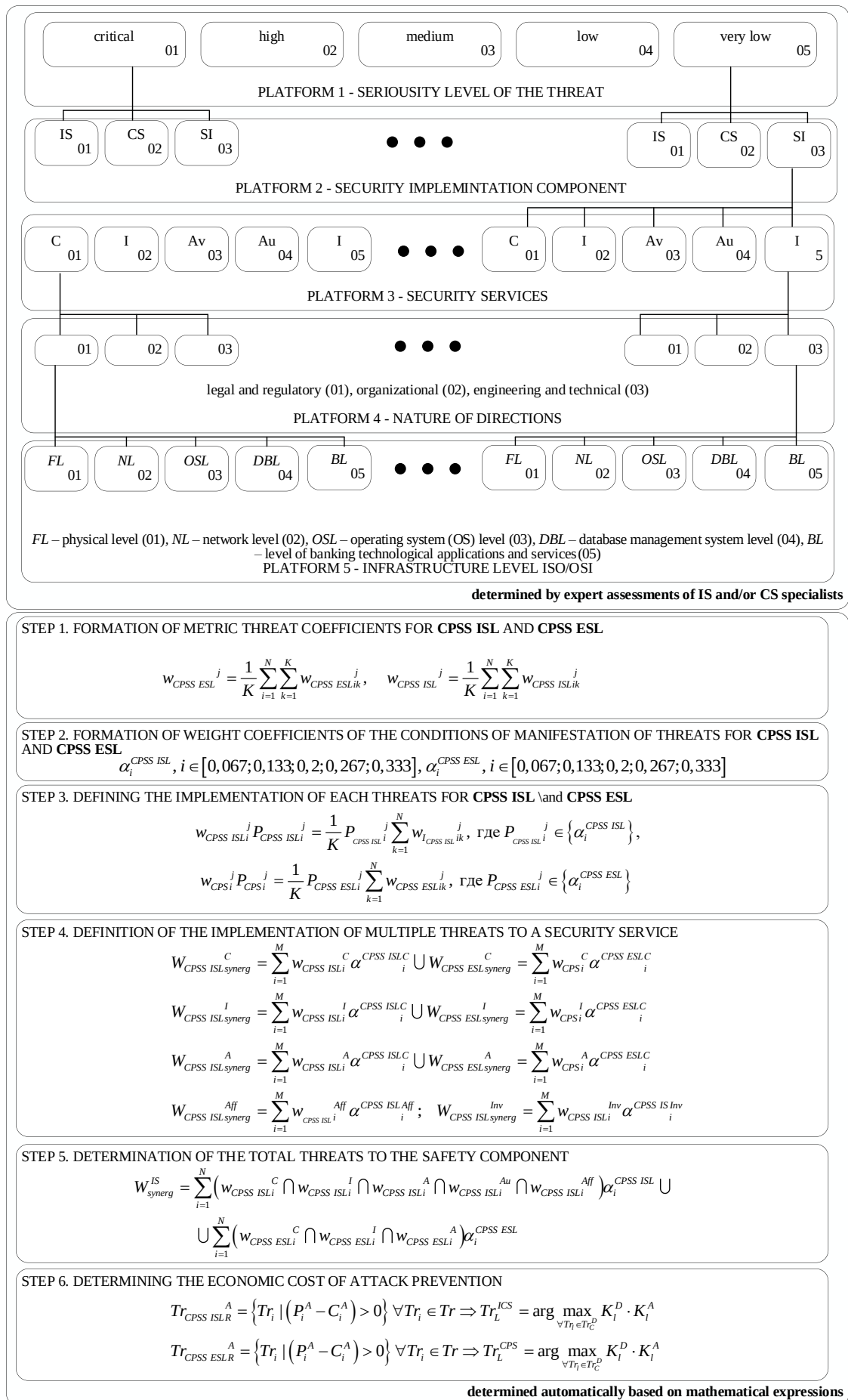


Fig. 4. Modification of the threat classifier

4-th step. Determination of coefficients of importance for defenders. Defined as the share of the gain from the total amount of the gain, which can potentially be obtained from the implementation of the entire complex of protective measures:

$$K_j^D = \frac{P_i^D - C_i^D}{\sum_{i=1}^N (P_i^D - C_i^D)}, \quad (12)$$

$$\forall Tr_j \in Tr_C^D, N = |Tr_C^D|,$$

where K_j^D – rating coefficient (importance) of building defense for j -th information resource.

5-th step. The selection of critical threats based on the evaluation of the product of the coefficients of importance, the attacker and the attacker is the maximum:

$$Tr_l = \arg \max_{\forall Tr_l \in Tr_C^D} K_l^D \cdot K_l^A. \quad (13)$$

Thus, the use of this classifier, as well as the introduction of economic indicators of the cost of carrying out an attack and the cost of measures to counter it, make it possible to obtain an integral assessment of the security of the system.

To obtain an assessment of the current state of information security based on the proposed concept of a two-contour information security system CPSS, let's assume that "1" will correspond to the maximum level of security that is provided by the security system as a whole, and "0" – corresponds to the absence of the required level of information protection.

To determine the probability of a threat being realized under the limiting possibilities of defense A and the limiting possibilities of attack B , we will use the probability density function of a random variable x – $F(x)$.

The specified probability is determined by the difference

$$F(B) - F(A),$$

where A – marginal level of protection side capabilities, B – the limiting level of the attacking side's ability to implement an attack.

We define the security level as the share of those resources that are protected from cyberattacks. It is easy to see that this quantity can be defined as follows:

$$S = F(B) - F(A) = \int_{-\infty}^B \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt - \int_{-\infty}^A \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt. \quad (14)$$

To assess the category of an attacker and determine his capabilities (computing and financial resources, economic interest), we use the attacker model and the method for determining the attacker category on CPSS applied in the work [9].

An analysis of the classification of intruders allows to form a set $\{H_j\}_{CPSS\ ISL}$, determining the levels of influence on the CPSS of the internal contour [9]:

- technical channels level (H_0);
- protocol stack physical level TCP/IP (H_1);
- protocol stack link level TCP/IP (H_2);
- network level protocol stack TCP/IP (H_3);
- protocol stack transport level TCP/IP (H_4);
- level of harmful impact (H_5);
- embedded device level (H_6);
- protocol stack application-level TCP/IP (H_7);
- information security system level (H_8).

In Table 2, the ratio of the categories of the intruder and the levels of their impact on the internal loop security system is determined.

Table 2 – The ratio of the categories of the violator and the levels of their impact

Category	Impact levels								
	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8
L_1^{del}	0	0	0	0	0	0	0	1	1
L_{11}^{del}	1	1	0	0	0	0	1	1	1
L_{12}^{del}	0	0	0	0	0	0	0	1	1
L_{13}^{del}	0	0	0	0	0	0	0	1	1
L_2^{del}	1	1	1	1	1	0	1	0	1
L_3^{del}	0	0	0	0	0	0	1	1	0
L_4^{del}	1	1	1	1	0	1	1	0	0
L_5^{del}	1	1	1	1	1	1	1	1	0
L_{51}^{del}	1	1	1	1	1	1	1	1	1
L_{52}^{del}	1	1	1	1	1	1	1	1	1
L_{53}^{del}	1	1	1	1	0	1	1	0	0
L_{54}^{del}	1	1	1	1	1	1	1	0	1
L_{55}^{del}	1	1	1	1	0	1	1	0	0
L_{56}^{del}	1	0	0	0	0	1	1	0	0
L_{57}^{del}	1	0	0	0	0	1	0	0	0

Elements of the set of categories of intruders

$$L_i^{del} \in \{L_i^{del}\}:$$

- L_1^{del} – users of CPSS;
- L_{11}^{del} – management of CPSS,
- L_{12}^{del} – employee of CPSS,
- L_{13}^{del} – users “at risk”;
- L_2^{del} – operating personnel;
- L_3^{del} – technical support staff;
- L_4^{del} – persons who are not employees of CPSS,

L_5^{del} – external intruders:

L_{51}^{del} – cyberterrorists,

L_{52}^{del} – special services,

L_{53}^{del} – hackers,

L_{54}^{del} – cybercriminals,

L_{55}^{del} – competitors,

L_{56}^{del} – criminality,

L_{57}^{del} – vandals.

Let's form a set $\{H_j\}_{CPSS\ ESL}$, determining the levels of influence on the CPSS of the external contour:

– the level of technical channels of cloud technologies (H_0);

– database management system level (H_1);

– service application layer (H_2);

– Azure Active Directory Domain Services level (H_3);

– the level of harmful effects on Security Development Lifecycle (H_4);

– SQL Databases (H_5);

– information security system level (H_6).

In Table 3, the ratio of the categories of the intruder and the levels of influence of the external contour of the protection system is determined.

The weight coefficient of the "danger" of the attacker is determined by the formula [9]:

$$\gamma_{ICS}^{CPS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_{ICS\ i}^{CPS}, \quad (15)$$

where

$$\gamma_{ICS\ i}^{CPS} = (\beta_i^{ICS} \cup \beta_i^{CPS}) \times p_{rj} \times r_{motiv},$$

$$\beta_i^{CPSS\ ISL} = W_{cp}^{CPSS\ ISL} \cap W_{cash}^{CPSS\ ISL} \cap T^{CPSS\ ISL},$$

$$\beta_i^{CPSS\ ESL} = W_{cp}^{CPSS\ ESL} \cap W_{cash}^{CPSS\ ESL} \cap T^{CPSS\ ESL} -$$

weighting coefficients of the intruder capabilities for CPSS ISL and CPSS ESL (respectively),

$W_{cp}^{CPSS\ ISL}$ ($W_{cp}^{CPSS\ ESL}$) – computing resources of the

intruder (1 – unlimited resources of cyberterrorists, 0,75 – state resources (special services), 0,5 – resources of cybercriminals, 0,25 – resources of criminality, competitors, hackers, 0,001 – vandal resources); $T^{CPSS\ ISL}$ ($T^{CPSS\ ESL}$) – time to carry out the threat (1 – the

Table 3 – The ratio of the categories of the violator and the levels of their impact

category	impact levels						
	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
L_1^{del}	0	0	0	0	0	0	0
L_{11}^{del}	1	1	0	0	0	0	1
L_{12}^{del}	0	0	0	0	0	0	0
L_{13}^{del}	0	0	0	0	0	0	0
L_2^{del}	1	1	1	1	1	0	1
L_3^{del}	0	0	0	0	0	0	1
L_4^{del}	1	1	1	1	0	1	1
L_5^{del}	1	1	1	1	1	1	1
L_{51}^{del}	1	1	1	1	1	1	1
L_{52}^{del}	1	1	1	1	1	1	1
L_{53}^{del}	1	1	1	1	0	1	1
L_{54}^{del}	1	1	1	1	1	1	1
L_{55}^{del}	1	1	1	1	0	1	1
L_{56}^{del}	1	0	0	0	0	1	1
L_{57}^{del}	1	0	0	0	0	1	0

threat is realized daily, 0,75 – the threat is realized within a week, 0,5 – the threat is realized within a month, 0,25 – the threat is realized within a year, 0,001 – unlimited time); $W_{cash}^{CPSS\ ISL}$ ($W_{cash}^{CPSS\ ESL}$) – economic

opportunities of attackers (1 – unlimited resources of cyberterrorists, 0,75 – state resources (special services), 0,5 – resources of cybercriminals, 0,25 – resources of criminality, competitors, hackers, 0,001 – vandal resources).

Table 4 shows the initial data of the criteria and indicators of the expert assessment of its location.

Analysis of tables 2–4 takes into account that the attack is determined by a complex criterion that includes account the cost of conducting and the computational capabilities available to the attacker. This approach ensures timely response to computer incidents depending on the category of intruder and ensures the required level of security.

Table 4 – Initial data of criteria and indicators of expert evaluation of the weight coefficient of the "danger" of the violator

Category	Weighting indicators							p_{rj}	r_{motiv}
	$\beta_i^{ICS} \in \left\{ \beta_i^{ICS} \right\}$			$\beta_i^{CPS} \in \left\{ \beta_i^{CPS} \right\}$					
	$W_{cp}^{CPSS\ ISL}$	$T^{CPSS\ ISL}$	$W_{cash}^{CPSS\ ISL}$	$W_{cp}^{CPSS\ ESL}$	$T^{CPSS\ ESL}$	$W_{cash}^{CPSS\ ESL}$			
critical	1	1	1	1	1	1	1	1	
high	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
median	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
low	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
very low	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	

Conclusions

In the context of the rapid growth of computing resources of wireless networks, their integration with the technologies of the mobile Internet and the Internet of Things allows to form an expansion of the range of services based on smart technologies and wireless networks. This approach ensures further integration and formation of sociocyberphysical networks, on the one hand. On the other hand, the emergence of new targeted attacks on the rapidly developing areas of the IT industry. In addition, the emergence of a quantum computer significantly increases the capabilities of cyber-intruders and cyber-terrorists. Under such conditions, the proposed

approach to the formation of the security system of sociocyberphysical systems based on the two-contour Security Concept provides an objective assessment of the current state of the CPSS security level.

The paper proposes a scheme of a unified classifier, taking into account the synergetic model of threats and economic costs to ensure the required level of security, including the construction of a security system consisting of two subsystems – the CPS protection system (internal security contour) and the SMS protection system (external security contour). This approach not only takes into account targeted attacks on individual elements of the CPSS, but also ensures the objectivity of the obtained results of assessing the security level.

REFERENCES

1. Gryshchuk, RV and Danyk, Yu. G. (2016), *Fundamentals of cyber security*, ZhNAEU, Zhytomyr, 2016, 636 p.
2. Yevseiev, S., Ryabukha, Yu., Milov, O., Milevskiy, S., Pohasii, S., Ivanchenko, Ye., Ivanchenko, I., Melenti, Ye., Opirskyy, I. and Pasko, I. (2021), "Development of a method for assessing forecast of social impact in regional communities", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/2 (114), pp. 30–47.
3. Feng, Xia and Jianhua, Ma (2011), "Building smart communities with cyber-physical systems", *SCI '11: Proceedings of 1st international symposium on From digital footprints to social and community intelligence*, September 2011, pp. 1–6, DOI: <https://doi.org/10.1145/2030066.2030068>.
4. Guo, B., Yu, Z. and Zhou, X. (2015), "A Data-Centric Framework for Cyber-Physical-Social Systems", *IT Prof.*, 17, pp. 4–7, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7332207>.
5. Kuang, L., Yang, L. and Liao, Y. (2015), "An Integration Framework on Cloud for Cyber Physical Social Systems Big Data", *IEEE Trans. Cloud Comput.*, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7364232>.
6. Lin, C.C., Deng, D.J. and Jhong, S.Y. (2017), "A Triangular NodeTrix Visualization Interface for Overlapping Social Community Structures of Cyber-Physical-Social Systems in Smart Factories", *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2030066.2030068>.
7. (2017), *Cyber-Physical-Social Frameworks for Urban Big Data Systems: A Survey*, DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app7101017>.
8. Yevseiev, S., Ponomarenko, V., Laptiev, O., Milov, O., Korol, O., Milevskiy, S.; Yevseiev, S., Ponomarenko, V., Laptiev, O., Milov, O. (Eds.) (2021), *Synergy of building cybersecurity systems*, PC TECHNOLOGY CENTER, Kharkiv, 188 p., DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-31-2>.
9. Shmatko, O., Balakireva, S., Vlasov, A., Zagorodna, N., Korol, O., Milov, O., Petrov, O., Pohasii, S., Rzayev, Kh. and Khvostenko V. (2020), "Development of methodological foundations for a classifier of threats to cyberphysical systems design", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/9 (105), pp. 6–19.
10. (2021), *Report on Post-Quantum Cryptography*, available at: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/NIST.IR.8105.pdf>.
11. Parthasarathy S. (2011), "Community discovery in social networks: applications, methods and emerging trends", *Social Network Data Analytics*, pp 79–113, DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8462-3_4.
12. Jimeng, Sun & Jie, Tang (2011), "A survey of models and algorithms for social influence analysis", *Social Network Data Analytics*, pp 177–214, DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8462-3_7.
13. Anagnostopoulos, A., Kumar, R. and Mahdian, M. (2008), "Influence and correlation in social networks" *Proceeding of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD'08)*, pp. 7–15, DOI: <https://doi.org/10.1145/1401890.1401897>.
14. Goyal, A., Bonchi, F. and Lakshmanan L. V. (2010), "Learning influence probabilities in social networks", *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM'10)*, pp. 207–217, DOI: <https://doi.org/10.1145/1718487.1718518>.
15. Xiang, R., Neville, J. and Rogati, M. (2010), "Modeling relationship strength in online social networks", *Proceeding of the 19th international conference on World Wide Web (WWW'10)*, pp. 981–990, DOI: <https://doi.org/10.1145/1772690.1772790>.
16. Scripps, J., Tan, P.-N. and Esfahanian, A.-H. (2009), "Measuring the effects of preprocessing decisions and network forces in dynamic network analysis", *Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD'09)*, pp. 747–756, DOI: <https://doi.org/10.1145/1557019.1557102>.
17. Merz, H., Hansemann, T. and Hübner, C. (2009), *Building Automation: Communication systems with EIB/KNX, LON und BACnet* / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 293 p.
18. (2017), *KNX Technical Manual 2CKA001473B8668. KNX Technical Manual. Busch-Presence detector KNX*, Busch-Watchdog Sky KNX, Busch-Jaeger Elektro GmbH, 198 p.
19. (2006), *Technical documentation on KNX devices*, ABB.
20. (2004), *KNX Handbook*, Version 1.1 Revision 1. Konnex Association.
21. (2016), *ABB i-bus KNX Security Panel GM/A 8.1 Product Manual*, Busch-Watchdog Sky KNX lektro GmbH, 648 p.
22. Schilder Jü. and Reibel T. (2016), *ABB GPG Building Automation Webinar ABB i-bus® KNX Basics and Products*, March 3, 2016, Busch-Watchdog Sky KNX Busch-Jaeger Elektro GmbH, 86 p.
23. (2017), *Manual for KNX Planning*, Siemens Switzerland Ltd, 100 p.
24. (2010), *Security Technology KNX-Intrusion Alarm System L240 Installation, Commissioning, Operation*, Busch-Watchdog Sky KNX, Busch-Jaeger Elektro GmbH, 116 p.

25. (2021), "Cloud" 10 years old. From a startup in the emerging market to a successful company and new heights, available at: <https://tadviser.com>.
26. Yevseiev, S., Melenti, Y., Voitko, O., Hrebeniuk, V., Korchenko, A., Mykus, S., Milov, O., Prokopenko, O., Sievierinov O. & Chopenko, D. (2021), "Development of a concept for building a critical infrastructure facilities security system" *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3(9(111)), pp. 63–83, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233533>.

Received (Надійшла) 21.02.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.04.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Погасій Сергій Сергійович – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Serhii Pohasii – 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: milevskiysv@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5087-7036>.

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>.

Воропай Наталя Ігорівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Natalya Voropay – Candidate of Engineering Sciences, Assistant, Department of Cyber Security, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: Natalia_Voropay@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1321-7324>.

Розробка концепції двоконтурного захисту соціокіберфізичних систем

С. С. Погасій, С. В. Мілевський, Б. П. Томашевський, Н. І. Воропай

Анотація. Бурхливий розвиток мобільних інтернет-технологій LTE (Long-Term Evolution) не тільки зумовив подальший розвиток кіберфізичних систем, що ґрунтуються на синтезі технологій класичних комп'ютерних систем та технологій та LTE, а також комплексуванні з технологіями інтернет-речей. Внаслідок чого поява соціокіберфізичних систем визначає подальший розвиток на основі даного комплексування. Створення mesh-, сенсорних мереж дозволяє також розвивати смарттехнології, і системи, засновані на їх конгломерації. Розвиток та створення квантового комп'ютера з одного боку дозволить зробити технічний прорив у обчислювальних ресурсах, використовувати штучний інтелект, а з іншого боку може призвести до "хаосу" у забезпеченні безпеки сучасних технологій та систем. Так на підставі алгоритмів квантової криптографії Шора та Гровера можуть бути зламані симетричні криптосистеми на основі алгоритмів традиційної криптографії, а також несиметричні криптосистеми, включаючи системи на основі криптографії на еліптичних кривих. У роботі пропонується використовувати новий підхід до побудови систем безпеки на основі Концепції внутрішнього та зовнішнього контурів безпеки. У цьому розглядаються контури безпеки безперервних бізнес-процесів. Такий підхід забезпечує об'єктивну оцінку поточного стану безпеки соціокіберсистеми загалом.

Ключові слова: двоконтурна Концепція безпеки; постквантовий період; квантовий комп'ютер; синергізм; гібридність кібератак.

Разработка концепции двухконтурной защиты социокіберфизических систем

С. С. Погасій, С. В. Милевский, Б. П. Томашевский, Н. И. Воропай

Аннотация. Бурное развитие мобильных интернет-технологий LTE (Long-Term Evolution) не только предопределило дальнейшее развитие киберфизических систем, которые основаны на синтезе технологий классических компьютерных систем и технологий и LTE, а также комплексировании с технологиями интернет-вещей. В следствии чего появление социо-киберфизических систем предопределяет дальнейшее развитие на основе данного комплексирования. Создание mesh-, сенсорных сетей позволяет так же развивать и смарт-технологии, и системы, основанные на их конгломерации. Развитие и создание квантового компьютера с одной стороны позволит сделать технический прорыв в вычислительных ресурсах, использовать искусственный интеллект, а с другой стороны может привести к "хаосу" в обеспечении безопасности современных технологий и систем. Так на основании алгоритмов квантовой криптографии Шора и Гровера могут быть взломаны симметричные криптосистемы на основе алгоритмов традиционной криптографии, а также несимметричные криптосистемы, включая и системы на основе криптографии на эллиптических кривых. В работе предлагается использовать новый подход к построению систем безопасности на основе Концепции внутреннего и внешнего контуров безопасности. При этом рассматриваются контуры безопасности непрерывных бизнес-процессов. Такой подход обеспечивает объективную оценку текущего состояния безопасности социо-киберсистемы в целом.

Ключевые слова: двухконтурная Концепция безопасности; постквантовый период; квантовый компьютер; синергизм; гибридность кибератак.

Applied problems of information systems operation

УДК 621.391

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.11>

Andrey Zuev, Andrey Ivashko, Denis Lunin

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

METHODS OF COMPENSATION OF MICROBOLOMETER MATRICES SELF-HEATING IN THE PROCESSING OF THERMAL IMAGES

Abstract. The sources of noise and artifacts arising during thermal imaging and the methods for thermal images filtering, including methods specific for processing of images generated by infrared sensors, are considered. In particular, distortions caused by the process of microbolometer matrices self-heating due to internal and external heating sources and the methods for compensating such distortions are studied. **The purpose of the study** is to create a mathematical model of a bolometric matrix self-heating based on heat transfer equations and to develop an algorithm for suppressing of distortions introduced into thermal images by self-heating. The exponential models describing the propagation of heat in the microbolometer matrix are proposed and it is shown that the coefficients of the models after logarithming can be determined by the least squares method. For real thermal images, the coefficients of the model are determined, and situations are considered when the base temperature of the object is known and when it is necessary to restore it, and modifications of the exponential model in the form of an exponent from a complete and incomplete square are proposed. Computer simulation of the proposed distortion compensation algorithm has been carried out, a set of thermal images before and after processing has been presented, and a quantitative estimation of the degree of noise suppression caused by heating of bolometric arrays has been obtained. Based on **the results of the work**, it was determined that the exponential model provides a sufficient degree of closeness of the experimental and theoretically predicted temperature data, and the degree of difference between the data and the model was estimated. Recommendations are developed for the application of the proposed methods at known and unknown base temperature of the matrix. Proposals have been developed for further improving the mathematical model, including the situation of temperature changes over time, and for improving the efficiency of self-heating noise suppression algorithms.

Keywords: thermal imaging; image processing; median filtering; microbolometric matrix; self-heating; mathematical model; least squares method.

Introduction

The emergence of commercial thermal cameras (thermal imagers), which are characterized by low price and size parameters, has greatly expanded the possibilities of remote non-contact temperature measurement in cases where it is necessary to monitor and control the thermal condition of objects with heat fluxes. The process of heat energy transfer, evolution or absorption of heat in the object leads to the fact that its temperature changes relative to the environment. The main parameter that carries information about the mode of operation of the object and defects in thermal monitoring is the temperature distribution over the surface of the object.

Thermal imaging are widely used in power engineering, construction and industry, as well as in the military. To register the state and monitor objects distributed over a large area (large industrial facilities and networks, agriculture and forestry) methods of automated monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs) are used [1]. In the process of automatic monitoring of power transmission lines, thermal imagers are usually installed on robotic platforms together with visible range cameras [2], and they allow to identify potential problems on insulators or power lines. In [3], it is noted that it is difficult to accurately measure the temperature of small objects, such as power line elements, even from a short distance.

Modern thermal imagers, as a rule, are made on the basis of special matrix temperature sensors - bolometers, while commercial bolometers are usually made uncooled to reduce the cost and size of equipment. The paper [4] shows the theoretical possibility of using thermal imagers with uncooled bolometric matrices for non-contact measurement of the temperature of power line wires and presents a method for determining the state of conductors by thermogram.

The mentioned papers emphasize that the methods of using thermal imagers for thermal monitoring of industrial infrastructure facilities are insufficiently developed and need further improvement.

Thus, the development of algorithms to reduce the influence of unfavorable external factors, to increase the accuracy of measurements and the reliability of identifying objects in thermal images is relevant.

Overview of noise and interference sources in thermal images and existing methods of their filtering

A significant number of works by domestic and foreign scientists are devoted to the analysis of sources of noise, interference and artifacts on thermal images and methods of reducing these interferences. Thus, in [5] possible noises arising at the analysis of thermal images is analyzed. It is shown that, depending on the type of sensors used and the experimental conditions, all the main types of noise such as Gaussian, Poisson, salt

and pepper, speckle noise are possible. In these cases, the measurement process is affected by weather conditions and interference on thermograms, which are caused both by the properties of the materials of objects and by the peculiarity of the functioning of thermal imagers (self-heating, low resolution, various defects).

In [6], the issues of using thermal imaging equipment to detect and control fires at industrial enterprises are considered. The factors that complicate the process of automated detection of objects are indicated: noisiness of useful signals not only by additive white Gaussian noise, but also by specific multiplicative noise, insufficient image contrast in comparison with visible range devices, high inertia of microbolometer sensors causes the effect of distortion of the shape of the object called "rolling shutter" [7].

To suppress noise, it is proposed in [6] to use the adaptive Kalman filtering and the adaptive median filtering. Thermal image processing, however, failed to overcome their traditional disadvantages: sensitivity to rounding errors for the Kalman filter, cutting corners on graphic objects, and insufficient suppression of white Gaussian and fluctuation noise for the median filter. Linear filtering of biomedical images in the infrared range, proposed in [8] to suppress additive noise and highlight objects, can cause loss of sharpness and blurring.

It is proposed in [9-12] to jointly solve the problem of filtering impulse interference and increasing the image contrast. In [9] the concept called *Background Thermal Compensation by Filtering, BTCF* is introduced, in [10] - the method of fast noise suppression. These technologies are implemented by dynamically selecting the size of the filtering window and decimation of the filtered sequence.

In [11, 12], together with median filtering, it is expected to use histogram equalization to increase the contrast of thermal images. At the same time, in [12], the histograms are equalized after an additive wavelet transformation in each subband separately, which allows to increase the contrast and to simplify the procedure of Sobel edge detection.

The disadvantages of the methods developed in [9-12] are typical for traditional median filtering - the complexity of adapting the degree of noise suppression to the level of noise in individual areas of the image and significant computational complexity, which makes it difficult to implement the developed algorithms in real time.

Thus, the insufficient performance of widely used microcontrollers required the authors of articles [13, 14] to construct a module for processing thermal images based on field-programmable gate arrays (FPGA) ALTERA. The module proposed in [13] provides two-dimensional FIR and median filtering, dynamic range expansion and pixel operations, the module described in [14] also implements affine transformations and provides thermal image processing at a rate of 12 to 46 frames per second. FPGA implementation of the proposed modules, however, complicates the dynamic correction of the algorithm during operation.

[15-16] consider the problem that does not arise when processing images in the visible part of the spectrum - uneven heating of microbolometric matrices caused by both external heat sources and heat fluxes emitted by elements of thermal imaging equipment. This phenomenon, called self-heating in [15-16], leads to distortions in thermal images - areas of abnormal brightness, usually at the edges and corners.

In order to reduce this problem in [15] it is proposed to construct a polynomial model of matrix heating, in [16] a model of heat distribution taking into account the substrate temperature is proposed. The values predicted on the basis of the constructed models can be used to correct the thermal image. A similar method of self-heating compensation distributed in lenses and infrared detectors is given in [17]. In [18] a model is proposed taking into account the electrical parameters of the microbolometric matrix. However, the results of the experiment presented in [15-18] demonstrate that the constructed models do not provide sufficient accuracy.

The aim of the article is to construct mathematical models of self-heating of the bolometer matrix in different conditions, to develop methods of correction of thermal images taking into account additionally introduced heat and to experimentally study the proposed algorithms.

Construction of a mathematical model of the self-healing process

Analysis of thermal images shows that the source of self-heating is primarily the corners of the matrix, that is, we assume that there is an instantaneous point source of heat. As shown in [19], in this case, as a result of solving the equation of thermal conductivity, we can obtain expressions for the value of the temperature for any point of a rectangular plate:

$$T(R, t) = \frac{Q}{c \cdot (4\pi\alpha t)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4\alpha t}\right) + T_0, \quad (1)$$

where T – is the temperature of the studied point of the object y with coordinates x, y ; T_0 – is temperature of the object at the initial moment of time; R – is the distance from the studied point of the object y A to the point of heat input O . If we assume that the origin of coordinates is at the point of heat input, $R = \sqrt{x^2 + y^2}$; t – is the time since the moment of heat input, with, s.; c – is the specific volume heat capacity, $J/(m^3 \cdot K)$; Q – the introduced amount of heat, J ; α – is the coefficient of thermal conductivity, m^2/s .

We fix a moment of time t and enter the coefficients

$$A = \frac{Q}{c \cdot (4\pi\alpha t)^{3/2}}, \quad \lambda = -\frac{1}{4\alpha t}.$$

Then the dependence of the temperature at some point of the plate from the distance of this point to the corner (origin of coordinates) will look like:

$$T(R) = A \cdot \exp(-\lambda R^2) + T_0 = \exp(\lambda R^2 + \mu) + T_0, \quad (2)$$

where $\mu = \ln A$.

Using the obtained equation, we can try to determine the coefficients of the model (1) by the values of temperature at individual points, to calculate the excess values of temperature introduced due to self-heating and to compensate them.

Determining the required coefficients by the least squares method can be difficult, and logarithmizing the sum in (2) is impossible. The most successful option may be to determine the base temperature T_0 , for example, by periodically measuring the temperature in the center of the thermal image (point C) in the absence of an object.

Then the temperature dependence takes form

$$T'(R) = T(R) - T_0 = \exp(\lambda R^2 + \mu). \quad (3)$$

After logarithmization (3) takes the form

$$\theta(R) = \ln T'(R) = \lambda R^2 + \mu. \quad (4)$$

Using the least squares method, we can find the unknown coefficients λ and μ in (3), obtain the probable distribution of excess heat entering the matrix as a result of self-heating, compensate it and reduce the level of interference and artifacts in thermal images.

Figure 1 shows a thermal image of a uniformly heated plate (temperature is displayed in arbitrary units in the range from 0 to 1). In the absence of interference, self-heating and other artifacts, the image should be uniform, but the above mentioned factors lead to the appearance of warmer (lighter in the image) areas at the edges of the plate.

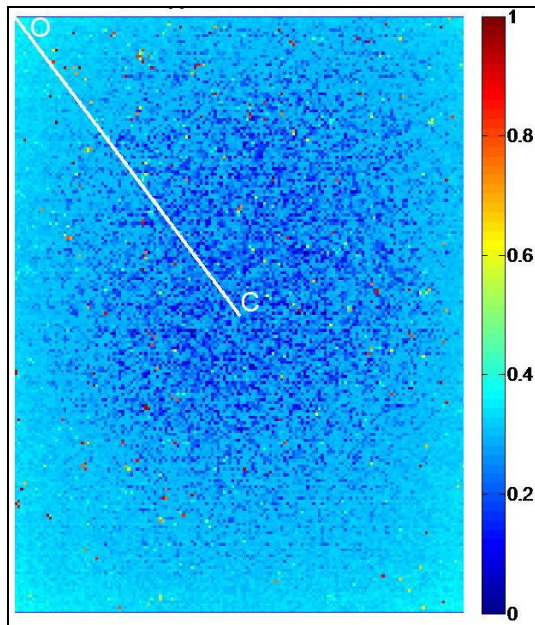


Fig. 1. Thermal image of a uniformly heated plate

To construct the model we take as the points of heat input O the corners of the plate and draw from each of the plate corners the rays towards the plate center, point C. Temperature values measured at points

along the ray OC form the temperature dependence from the distance from the plate corner in Fig.2). At the same time, in order to suppress impulse noise that complicate further processing, the thermal image is subjected to median filtration [6].

Experimental research of the developed method

By measuring the temperature at point C of the plate and subtracting it from all values of the temperature on the OC ray, we obtain a data set suitable for constructing a model. According to the expressions (2) - (4), we logarithm the sequence of samples and reconstruct the unknown coefficients of the polynomial model (4) by the least squares method.

For the considered upper left corner of the thermal image in Fig. 1 the temperature in the center of the plate will be $T_0 = 0,2631$, the coefficients of the model (4):

$$\lambda = -1,6807 \cdot 10^{-5}, \quad \mu = -2.5293.$$

Thus, according to (2), the temperature dependence takes the form:

$$T(R) = \exp(\lambda R^2 + \mu) + T_0 = \exp(\mu) \cdot \exp(\lambda R^2) + T_0 = 0,0797 \cdot \exp(-1,6807 \cdot 10^{-5} \cdot R^2) + 0,2631. \quad (5)$$

The dependence made according to the formula (5) is shown by a dash-dotted line in Fig. 2.

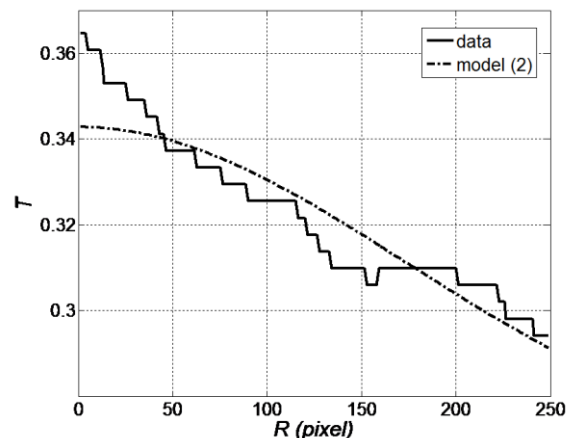


Fig. 2. Experimental and theoretical (2) dependences of temperature on the distance to the corner of the plate

In this case, the input excess heat will be

$$\begin{aligned} T'(R) &= T(R) - T_0 = \exp(\lambda R^2 + \mu) = \\ &= 0,0797 \cdot \exp(-1,6807 \cdot 10^{-5} \cdot R^2). \end{aligned} \quad (6)$$

Rays can be drawn in a similar way and models can be constructed for the other three corners of the thermal image matrix.

By calculating similarly (6) for each of the corners and a quarter of the adjacent image, the amount of additional heating, we subtract the values obtained from the temperature distribution matrix that forms the thermal image. The processed image, on which the distortions due to self-heating are partially compensated, is shown in Fig. 3.

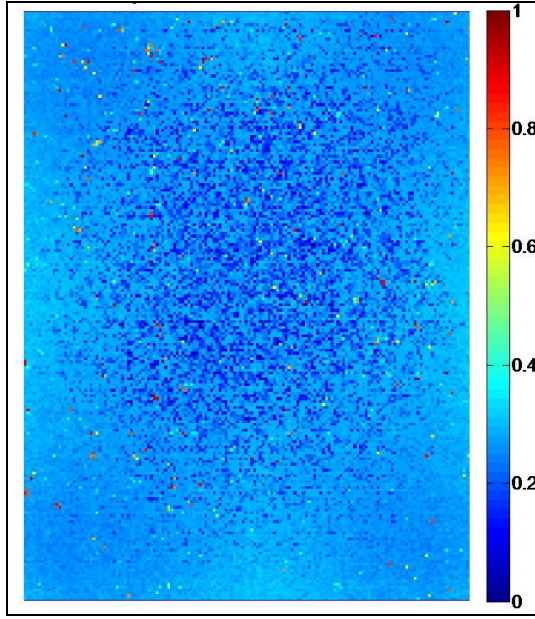


Fig. 3. Thermal image of a uniformly heated plate after processing

Comparing Fig. 1 and 3, it can be seen that the distortions due to self-heating, which look like the lighter areas adjacent to the corners, in Fig.3 are significantly weakened.

The degree of suppression of distortions can be quantified. In the absence of interference and artifacts, the entire surface of the plate must have the same temperature, that is, the temperature values at all points of the image must coincide with the temperature in the center of the matrix T_0 . Then the relative mean square error will be defined as:

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (a_{ij} - T_0)^2} / (N \cdot M \cdot T_0), \quad (7)$$

where N, M – are the height and width of the image, respectively, a_{ij} – is relative value of temperature at the point of the image.

For the analyzed image, the values of the relative error will be: before processing $\varepsilon_1=0,023$, after processing $\varepsilon_2=0,016$.

Thus, the degree of interference suppression will be equal $k_1=\varepsilon_1/\varepsilon_2=1,4375$.

If it is possible to measure the base temperature in the center of the image, the described technique can be used to process thermal images containing objects that differ sharply in temperature from the background.

An example of such an image is shown in Fig. 4. Obviously, it is difficult to determine the base temperature. In this case, as in Fig. 1, in the corners and edges of the image we can see the results of self-heating, which are manifested as lighter areas.

Since the measurements were made under the same conditions, the models (5) and (6) obtained above and the coefficients can be used in this case as well. As in the previous case, we calculate by formula (6) and the values of the introduced heating by similar to it, and compensate the distortions introduced due to self-heating. The results of processing are shown in Fig. 5.

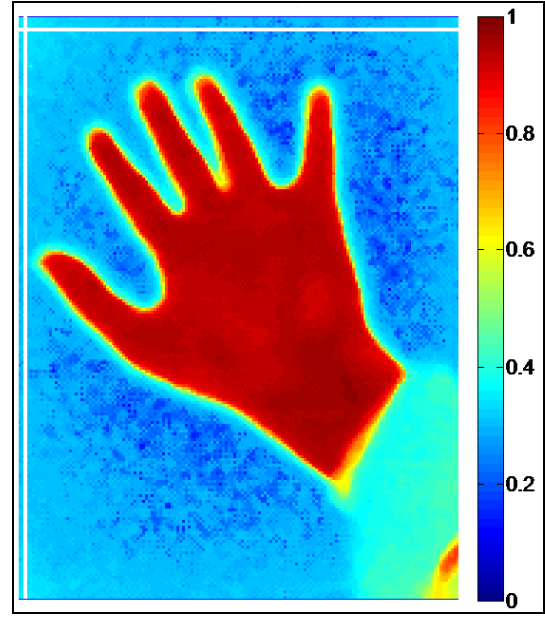


Fig. 4. Thermal image containing a contrast object

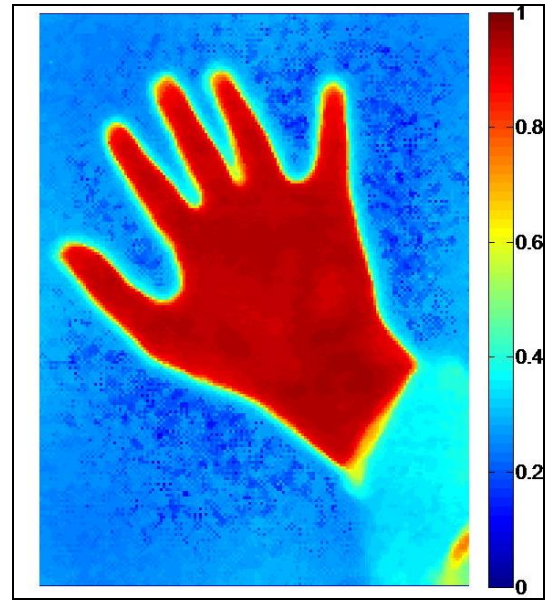


Fig. 5. Processed image containing a contrast object

The figure shows that, as in the case of a uniformly heated plate, the distortions introduced due to self-heating are weakened.

However, it is not always possible to determine the base temperature T_0 .

In such cases, it is appropriate to modify the heat distribution model.

We choose as a model the ratio

$$T(R) = \exp(\lambda R^2 + \nu R + \mu). \quad (8)$$

As in the previous case, we logarithm (8) and obtain a polynomial dependence

$$\theta(R) = \ln T(R) = \lambda R^2 + \nu R + \mu, \quad (9)$$

for finding the coefficients of which we can use the least squares method. Then it is still possible to get a picture of the distribution of excess heat and compensate its effect on the thermal image.

As the basic value of temperature, the point in which function (8) takes the minimum value, that is, size can be chosen $T(-\nu/(2\lambda))$.

If it is difficult to construct model (8) in any of the corners and the results predicted by the model deviate significantly from the initial data (for example, the lower right corner in Fig. 4), the model coefficients can be taken from another corner where the best compliance is provided.

According to the proposed algorithm, the image in Fig. 4 was processed. Construction of the model (8) of heat distribution in a rectangular plate for one of the corners is shown in Fig. 6.

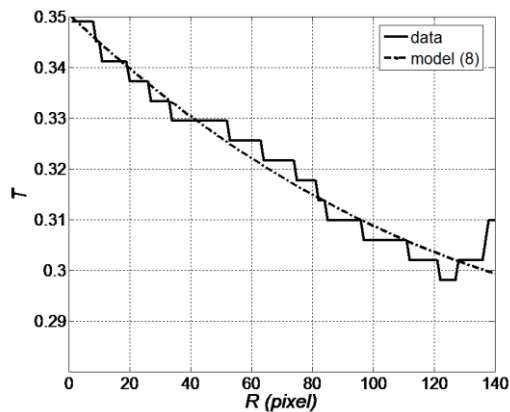


Fig. 6. Experimental and theoretical (8) dependences of temperature on the distance to the corner of the plate

After logarithmization of the data and application of the least squares method, the coefficients of the model are determined:

$$\lambda = 3,471 \cdot 10^{-6}; \quad \nu = -0,0016; \quad \mu = -1,0484.$$

$$T_0 = T\left(-\frac{\nu}{2\lambda}\right) = T(230,478) = 0,3003.$$

For each of the corners, the coefficients of the model (8) are calculated and the distortions introduced due to self-heating are compensated. The results of processing are shown in Fig. 7.

Visual analysis shows that image distortion caused by heat is largely eliminated, although not as in Fig. 5.

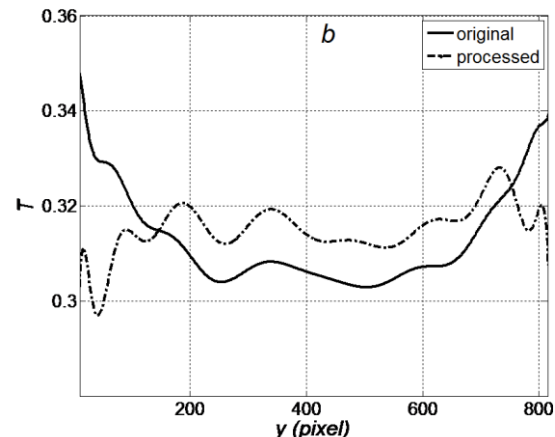
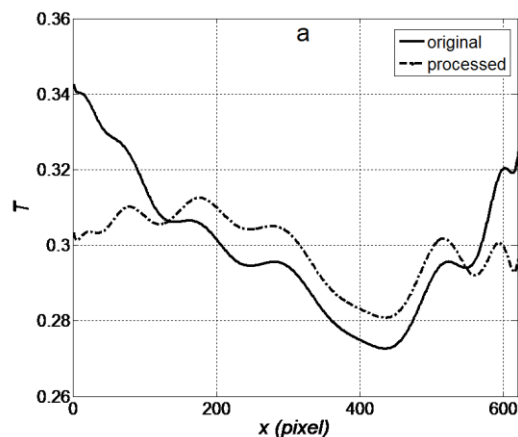


Fig. 8. Temperature distribution along the twentieth row (a) and the tenth column (b) of the image before and after processing

To assess the distortions introduced due to self-heating and the degree of their suppression, it is appropriate to analyze the temperature distribution along a single row or column of the image. The smoothed curves corresponding to the change in temperature along the twentieth row and the tenth column of the image (highlighted in Fig. 4) are shown in Fig. 8. The figure shows that the temperature rise towards the edges of the image, which is clearly visible on the initial curves and caused by self self-heating, are largely suppressed after processing.

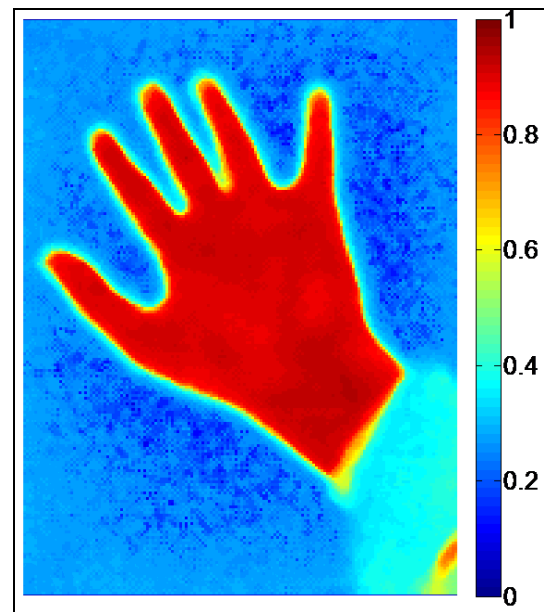


Fig. 7. The image processed according to (8)

Visual analysis shows that image distortion caused by heat is largely eliminated, although not as in Fig. 5.

To assess the distortions introduced due to self-heating and the degree of their suppression, it is appropriate to analyze the temperature distribution along a single row or column of the image. The smoothed curves corresponding to the change in temperature along the twentieth row and the tenth column of the image (highlighted in Fig. 4) are shown in Fig. 8.

The figure shows that the temperature rises towards the edges of the image, which is clearly visible on the initial curves and caused by self-heating, are largely suppressed after processing.

Conclusions

1. The process of self-heating of the microbolometric matrix can cause distortions in thermal images, which complicate the analysis and detection of objects in the images.

2. Exponential mathematical models quite accurately describe the process of self-heating of the microbolometer matrix.

3. The use of constructed models allows to compensate the distortions caused by the effect of self-heating on thermal images and to reduce the interference level by 44%. In this case, the efficiency of the method increases if it is possible to determine the base temperature in the center of the image.

4. It is possible to refine the model by taking into account the input of excess heat not only from the corners but also from the edges of the microbolometric matrix. In addition, it would be relevant to study the dynamics of the behavior of the model coefficients over time in order to predict and compensate distortions.

REFERENCES

1. Zuev A. (2018), "The method of primary processing of thermograms obtained using small-size thermal imagers", *Advanced Information Systems*, Vol 2, No. 4, pp. 136 – 140, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.4.23>.
2. Zheng, L. & Yi, R. (2009), "Fault diagnosis system for the inspection robot in power transmission lines maintenance", *Proc. SPIE 7513. International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging and Process Technology*, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.837984>.
3. Stockton, G.R. & Tache, A. (2006), "Advances in applications for aerial infrared thermography", *Proc. SPIE 6205 (Thermosense XXVIII)*, April 2006, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.669513>.
4. Qin, L., Chen, S., Gao, Q. & Yi X. (2000), "Inspection for electric power systems using uncooled infrared camera", *Proc. 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, Conference Digest*, pp. 441-442. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2000.893097>.
5. Salami, A.M., Salih, D.N. & Fadhil, A.F. (2021), "Thermal Image Features and Noise Effects Analysis", *2021 7th International Engineering Conference "Research & Innovation amid Global Pandemic" (IEC)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/IEC52205.2021.9476100>.
6. de Vries, J. (2014), "Quantitative analysis and image processing techniques of large-scale industrialize fire tests using infrared thermography", *12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2014)*, France, Bordeaux, 7 - 11 July 2014, DOI: <https://doi.org/10.21611/qirt.2014.042>.
7. Sheinin, M., Schechner, Y. Y. & Kutulakos, K. N. (2018), "Rolling shutter imaging on the electric grid", *2018 IEEE Int. Conf. on Computational Photography (ICCP)*, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCPHOT.2018.8368472>.
8. Gavriloiu, B.-M., Vizireanu, R.-C. & Neamtu, C. M. (2013), "An Improved Method for IR Image Filtering from Living Beings", *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 3395-3398, DOI: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6610270>.
9. Restrepo, A. D. & Loaiza-Correa, H. (2016), "Background Thermal Compensation by Filtering for Contrast Enhancement in Active Thermography", *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, Vol. 35, is. 1, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0336-x>.
10. Chih-Lung, Lin, Chih-Wei, Kuo, Chih-Chin, Lai & Ming-dar, Tsa (2011), "A novel approach to fast noise reduction of infrared image", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 54, is. 1, pp. 1-9, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.09.007>.
11. Kondratov, P., Oganessian, A., Tkachenko, V., Prudyus, I., Lazko, L. & Mymrikov, D. (2016), "Thermal images improving based on cumulative histogram correction and median filtering methods", *2016 13th Int. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7452170>.
12. Ashiba, H. I., Mansour, H. M. & Dessouky, M. I. (2019), "Enhancement of IR images using histogram processing and the undecimated additive wavelet transform", *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 78, is/ 9, pp. 11277–11290, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6545-9>.
13. Bieszczad, G., Kastek, M. & Barela, J. (2011), "Image processing module for high-speed thermal camera with cooled detector", *Proc. of SPIE - The Int. Society for Optical Engineering*, May 2011, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.883914>.
14. Bieszczad, G. (2016), "SoC-FPGA embedded system for real-time thermal image processing", *MIXDES 2016, 23rd Int. Conf. "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems"*, pp. 469-473, DOI: <https://doi.org/10.1109/MIXDES.2016.7529788>.
15. Bieszczad, G., Orzanowski, T., Sosnowski, T. & Kastek, M. (2009), "Method of detectors offset correction in thermovision camera with uncooled microbolometric focal plane array", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, September 2009, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.830678>.
16. Bieszczad, G. & Kastek, M. (2011), "Measurement of Thermal Behavior of Detector Array Surface with the Use of Microscopic Thermal Camera", *Metrology and Measurement Systems*, January 2011, DOI: <https://doi.org/10.2478/v10178-011-0064-6>.
17. Zhigang, Fan, Haili, Hu, Wang, Zhang, Jianjun, Liu & Shouqian Chen (2012), "Self-thermal Radiation Compensation for Autofocus Algorithm in Infrared Optical System", *2012 5th International Congress on Image and Signal Processing (CISP 2012)*, pp. 1330-1334, DOI: <https://doi.org/10.1109/CISP.2012.6469680>.
18. Wolf, A. & Pezoa, J. E., Figueroa M. (2016), "Modeling and Compensating Temperature-Dependent Non-Uniformity Noise in IR Microbolometer Cameras", *Sensors*, Vol. 16, is. 7, 1121, DOI: <https://doi.org/10.3390/s16071121>.
19. Kumar, K. S. (2014), "Analytical Modeling of Temperature Distribution, Peak Temperature, Cooling Rate and Thermal Cycles in a Solid Work Piece Welded By Laser Welding Process", *3rd Int. Conf. on Materials Proc. and Char/ (ICMPC 2014)*, pp. 821-834, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.0>.

Received (Надійшла) 14.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.05.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Зуєв Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Andrey Zuev – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, head of the department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: dakarton@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8206-4304>.

Івашко Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Andrey Ivashko – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: ivashkoauts@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0012-1697>.

Лунін Денис Олександрович – старший викладач кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Denis Lunin – Senior Lecturer of the department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: lunindenis77@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9418-0000>.

**Методи компенсації самонагріву мікроболометричних матриць
при обробці тепловізійних зображень**

А. О. Зуєв, А. В. Івашко, Д. О. Лунін

Анотація. Розглянуто джерела шумів та артефактів, що виникають при побудові тепловізійних зображень та методи їх фільтрації, у тому числі методи, специфічні для обробки зображень, що формуються датчиками інфрачервоного випромінювання. Зокрема, досліджено спотворення, спричинені процесом самонагріву мікроболометричних матриць, обумовленого внутрішніми та зовнішніми джерелами нагрівання та методи компенсації таких спотворень. **Метою дослідження** є побудова математичної моделі самонагріву болометричної матриці на основі рівнянь теплопередачі та розробка алгоритму придушення спотворень, що вносяться самонагрівом у тепловізійні зображення. Запропоновано експоненціальні моделі, що описують розповсюдження тепла в мікроболометричній матриці, показано, що коефіцієнти моделей після логарифмування можуть бути визначені методом найменших квадратів. Для реальних тепловізійних зображень визначено коефіцієнти моделей, причому розглянуті ситуації, коли базова температура об'єкта відома і коли необхідно її відновлення, а також запропоновані модифікації експоненційної моделі у вигляді експоненти від повного та неповного квадрата. Проведено комп'ютерне моделювання запропонованого алгоритму компенсації спотворень, представлено набір тепловізійних зображень до та після обробки та отримано кількісну оцінку ступеня придушення перешкод, обумовлених нагріванням болометричних матриць. За **результатами роботи** визначено, що експоненціальна модель забезпечує достатню міру близькості експериментальних та теоретично передбачених температурних даних та оцінено міру розбіжностей між даними та моделлю. Розроблено рекомендації щодо застосування запропонованих методів за відомої та невідомої базової температури матриці. Вироблено пропозиції щодо подальшого уточнення математичної моделі, у тому числі в ситуації зміни температури за часом, та підвищення ефективності алгоритмів придушення перешкод, спричинених самонагріванням.

Ключові слова: тепловізори; обробка зображень; мікроболометрична матриця; самонагрів; математична модель; медіанна фільтрація; метод найменших квадратів.

**Методы компенсации самонагрева микроболометрических матриц
при обработке тепловизионных изображений**

А. А. Зуев, А. В. Ивашко, Д. А. Лунин

Аннотация. Рассмотрены источники шумов и артефактов, возникающих при построении тепловизионных изображений и методы их фильтрации, в том числе методы, специфичные для обработки изображений, формируемых датчиками инфракрасного излучения. В частности, исследованы искажения, вызванные процессом самонагрева микроболометрических матриц, обусловленного внутренними и внешними источниками нагрева и методы компенсации таких искажений. **Целью исследования** является построение математической модели самонагрева болометрической матрицы на основе уравнений теплопередачи и разработка алгоритма подавления искажений, вносимых самонагревом в тепловизионные изображения. Предложены экспоненциальные модели, описывающие распространение тепла в микроболометрической матрице, показано, что коэффициенты моделей после логарифмирования могут быть определены методом наименьших квадратов. Для реальных тепловизионных изображений определены коэффициенты моделей, причем рассмотрены ситуации, когда базовая температура объекта известна и когда необходимо ее восстановление, а также предложены модификации экспоненциальной модели в виде экспоненты от полного и неполного квадрата. Проведено компьютерное моделирование предложенного алгоритма компенсации искажений, представлен набор тепловизионных изображений до и после обработки и получена количественная оценка степени подавления помех, обусловленных нагреванием болометрических матриц. По **результатам работы** определено, что экспоненциальная модель обеспечивает достаточную степень близости экспериментальных и теоретически предсказанных температурных данных и оценена степень расхождений между данными и моделью. Разработаны рекомендации по применению предложенных методов при известной и неизвестной базовой температуре матрицы. Выработаны предложения по дальнейшему уточнению математической модели, в том числе в ситуации изменения температуры по времени, и повышению эффективности алгоритмов подавления помех, вызванных самонагреванием.

Ключевые слова: тепловизоры; обработка изображений; медианная фильтрация; микроболометрическая матрица, самонагрев; математическая модель; метод наименьших квадратов.

О. В. Коломійцев¹, В. О. Комаров², О. М. Дмитрієв³, В. В. Пустоваров⁴, Р. М. Олійник⁵

¹ Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

² Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, Київ, Україна

³ Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

⁴ Харківське представництво генерального замовника – Державне космічне агентство України,
Харків, Україна

⁵ Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки, Чернігів, Україна

МЕТОД КОНТРОЛЮ ЧАСТОТИ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВАГИ ТІЛА КОСМОНАВТА І МАЛОЇ ВАГИ В УМОВАХ НЕВАГОМОСТІ

Анотація. В статті проведено аналіз існуючих основних методів визначення ваги тіла космонавтів і об'єктів малої ваги в умовах невагомості та розкрито їх особливості застосування. Найбільш зручним і перспективним способом визначення інерціальної ваги тіла в умовах невагомості вважається використання різного роду осциляторів та приладів, що дозволяють вимірювати параметри тіла космонавта (об'єктів малої ваги приладів тощо), яке коливається. Можливо використовувати залежність періоду коливань пружини від ваги закріпленого на ній тіла космонавта тощо. Розглянуто вимірювач ваги «ИМ-01М», його технічні характеристики, склад та принцип дії. Такий вимірювач можливо доповнити системою зважування космонавтів (астронавтів) за методом Кармело Велардо, який дозволяє отримати данні про глибину об'єкту вимірювання (форму і розміри космонавта та його руху). **Об'єктом дослідження** є осцилятори та прилади, що дозволяють вимірювати параметри тіла космонавта і об'єктів малої ваги, які коливаються. **Предметом дослідження** є математичний апарат щодо визначення частоти власних коливань динамічної системи. **Метою наукової роботи** є розробка методу контролю частоти власних коливань для визначення ваги тіла космонавта і об'єктів малої ваги в умовах невагомості. **Висновки.** Запропоновано метод визначення ваги тіла космонавтів і об'єктів малої ваги в умовах невагомості та його реалізацію за зміною частоти власних коливань. Представлено аналітичні вирази для розрахунку частоти власних коливань динамічної системи та відповідні графіки. Розроблено пружно-ваговий пристрій для проведення вимірювань. Приведено схемо-технічне рішення пристрою, розкрито його склад і принцип дії. Пристрій спроможний визначити вагу об'єкта контролю та його стан (неоднорідність, наявність рідкого наповнювача, частин, що коливаються тощо).

Ключові слова: невагомість; вага тіла космонавта; динамічна система; частота власних коливань; одноступеневий осцилятор; пружно-ваговий пристрій.

Вступ

Постійне вдосконалення космічної техніки відкриває нові широкі перспективи щодо подальшого вивчення та використання космічного простору на користь науки. Роки космічної ери підтвердили велике майбутнє у напрямку освоєння та використання космосу на користь людства. Нині у космосі систематично працюють штучні супутники Землі різних серій, несуть ваhti метеорологічні супутники, супутники зв'язку та рятувальні супутники, а також плідно працюють довготривалі орбітальні станції. Усі роботи супутників пов'язані з великим вантажопотоком трасою Земля-орбіта-Земля. Створення нових космічних комплексів та транспортних засобів є головним завданням доставки на орбіту та повернення з неї корисних вантажів малої та великої ваги. Такі транспортні засоби дозволяють повертати з орбіти на Землю з автоматичних апаратів матеріали наукових досліджень та експериментів, у тому числі обладнання, що вийшло з ладу. За необхідністю може бути повернений на Землю для профілактики, ремонту або модернізації й сам супутник, що дасть істотний економічний ефект.

Таким чином, різноманітні завдання, які пов'язані з визначенням ваги об'єктів (наприклад, визна-

чення ваги супутника, що підготовлений до завантаження у космічний апарат, що спускається, необхідність у вирішенні яких має істотне значення для центрального самого апарата, що спускається, або контроль за зміною ваги космонавтів при тривалому орбітальному польоті тощо), дозволяє стверджувати про актуальність створення високоточного пристрою для визначення ваги тіла космонавтів і об'єктів малої ваги в умовах невагомості.

Постановка проблеми

Відомо, що невагомість – це стан тіла, при якому воно рухається тільки під дією сили тяжіння. Також, невагомість – це стан механічної системи, при якій діючі на систему зовнішні гравітаційне поле не викликає взаємного тиску однієї частини системи на іншу та їх деформації [1-7].

Невагомість виникає тоді, коли у тілах, що вільно рухаються, зникають додаткові деформації і взаємний тиск, людина (космонавт) перестає відчувати рух і свою вагу.

Це відбувається тоді, коли тіло рухається з прискоренням, що спрямовано вниз і чисельно дорівнює прискоренню вільного падіння.

У зв'язку з істотною відмінністю умов невагомості від земних умов, у яких створюються і відла-

годжуються прилади і агрегати штучних супутників Землі, космічних кораблів і їх ракет-носіїв, проблема невагомості займає важливе місце серед інших проблем космонавтики. Це найбільш важливо для систем із внутрішніми об'ємами, частково заповненими рідиною.

До таких систем відносяться рухомі установки з рідинними ракетними двигунами (рідинні реактивні двигуни), що призначені для багатократної активності в умовах космічного польоту, механізми космічного корабля (для відкривання сонячних панелей, антен, для стикування тощо), що призначені для роботи в умовах невагомості.

Крім цього, невагомість може бути використана для реалізації деяких технологічних процесів, які важко або неможливо реалізувати в земних умовах (наприклад, отримання композитних матеріалів з однорідною структурою за усім об'ємом, отримання тіл точної сферичної форми з розплавленого матеріалу за рахунок сил поверхневого натягу тощо).

Найбільш зручним і перспективним способом визначення інерціальної ваги тіла в умовах невагомості вважається використання різного роду осциляторів та приладів, що дозволяють вимірювати параметри тіла, що коливається [1-7]. Наприклад, тіло фіксується між двома пружинами, його відхиляють від положення рівноваги і вимірюють характеристики коливань пружної системи з приєднаною до неї тіла космонавта (об'єкта).

Коливання відбуваються під дією виникаючих сил пружності. При вимірюванні ваги використовують закон Гуку.

Наприклад, для зважування тіла космонавта в умовах невагомості для станцій «Салют» і «Мир» та Міжнародної космічної станції (МКС) розроблено спеціалізований стілець «ИМ-01М», у якому враховується залежність періоду коливань пружини від ваги закріпленого на ній тіла космонавта [8, 9, 11].

В той же час, відомий метод визначення ваги тіла космонавта в умовах невагомості, який аналізує форму і розміри людини, а також його рухи [10]. За отриманими параметрами з використанням статистичної моделі, що побудована на основі аналізу антропометричних даних 28 тис. чоловік, визначають вагу тіла космонавта. Таким чином, детальне вивчення напрямку визначення ваги тіла в умовах невагомості дуже важливе.

Сили тяжіння діють на усі частки тіла у стані невагомості, але на поверхню тіла не діють зовнішні сили (наприклад, реакції опори тощо), які могли б викликати взаємний тиск часток одна на другу. Подібне явище спостерігається для тіл, що розташовані на штучному супутнику Землі (космічному кораблі). Такі тіла і усі їх частки, отримавши відповідну початкову швидкість разом із супутником, рухаються під дією гравітаційних сил зі своїх орбіт з рівними прискореннями, неначе вільні, не чинячи взаємного тиску одна на одну, тобто вони знаходяться у стані невагомості. Подібно до тіла у ліфті, на них діє сила тяжіння, але на поверхні тіл не діють зовнішні сили, які могли б викликати взаємний тиск тіл або їх часток одна на другу.

Отже, тіло під впливом зовнішніх сил знаходиться у стані невагомості, якщо:

- зовнішні сили діють тільки масивно (гравітаційні сили);

- поле цих масованих сил локальне й однорідне, тобто сили поля надають усім часткам тіла у кожному з його положень однакову величину і напрям прискорення;

- початкові швидкості усіх часток тіла однакові за величиною і напрямом (рухається вперед).

Таким чином, будь-яке тіло, розміри якого малі у порівнянні з радіусом Землі, здійснюючи вільний поступальний рух у гравітаційному полі Землі, у відсутності зовнішніх сил, буде знаходитися у стані невагомості. Результат буде аналогічним для руху у гравітаційному полі будь-яких інших небесних тіл.

У техніці і побуті широко використовується поняття ваги тіла – сумарна сила пружності, що діє при наявності сили тяжіння на усі опори та підвіси. Вага тіла, як відомо, є мірою його інерційності. У земних умовах інерційність тіла проявляється при дії прискорення вільного падіння g . У разі невагомості вагу тіла можливо визначити під час створення штучного прискорення. При цьому, можуть бути використані різні способи його реалізації (шляхом створення рівноприскореного обертального руху).

На даний час на борту МКС для зважування тіла космонавта (астронавта) використовується спеціалізований стілець на пружинах, який розгойдують за допомогою спеціальних моторів з вивіренням зусилля (рис. 1) [8, 9].



Рис. 1. Зовнішній вигляд вимірювача ваги тіла космонавта і малої ваги у невагомості «ИМ-01М»
(Fig. 1. Original Appearance of the astronaut's body weight meter and small weight of cosmonaut is in the weightlessness of «ИМ-01М»)

Частота коливань стільця залежить від ваги вантажу так, що космонавту (астронавту) досить зробити декілька коливань, щоб через півхвилини електроніка порахувала і видала результат зважування. При цьому, використовується залежність періоду коливань пружини від ваги закріпленого на ній тіла. Вимірювач ваги тіла і малої ваги у невагомості

«ИМ-01М» має власну вагу, що складає 11 кг. Модернізований варіант даного вимірювача, що вико-

ристовується і знаходиться зараз на МКС, представлено на рис. 2.



Рис. 2. Використання модернізованого варіанта «ИМ-01М» на борту МКС
(Fig. 2. There is the use of the modernized variant of «ИМ-01М» on board International space station)

Вимірювач побудований за схемою гармонійного осцилятора. Як відомо, період вільних коливань вантажу на пружині залежить від його ваги.

Таким чином, система осцилятора перераховує на вагу період коливань спеціальної платформи з розміщеним на ній космонавтом (або будь-яким іншим предметом (пристроєм)). Тіло, вагу якого потрібно виміряти, закріплюють на пружині таким чином, щоб воно могло здійснювати вільні коливання уздовж вісі пружини [11].

Вимірювач виглядає як «стілець» та складається з чотирьох основних частин:

- платформи, на якій розміщується космонавт (верхня частина);
- основи, яка кріпиться до «підлоги» станції (нижня частина);
- стійки та механічної середньої частини;
- електронного блоку вимірювання показань.

У нижній частині стійки закріплений магнітоелектричний датчик, що фіксує період коливання рухомої системи. Датчик автоматично враховує тривалість періоду коливань з точністю до тисячної частки секунди. Отже, частота коливань «стілця» залежить від ваги вантажу (космонавта).

Також, існує метод визначення ваги тіла космонавтів, який працює швидко та не вимагає відвернення уваги людини [10]. Кармело Велардо з інституту Eurescom розробив незвичайну систему зважування астронавтів і космонавтів там, де власне ваги то й немає та звичайні ваги працювати не можуть. Вчений вирішив задіяти можливості камери Kinect.

Цей прилад відчуває глибину об'єктів, сцени і використовується як ігровий контролер.

У системі Велардо така камера допомагає будувати тривимірну цифрову модель тіла людини, що потрапила у поле зору об'єктива. Придуманий винахідником і його співавторами софтвер аналізує форму і розміри людини, а також його рухи. Далі, отримані параметри визначаються у вагу з використанням статистичної моделі, що побудована на основі аналізу антропометричних даних 28 тис. чоловік.

За заявою автора, точність визначення ваги тіла космонавта за його методом складатиме 97 %, що відповідає похибці у 2,5-3 кг. Це не так вже погано, оскільки у ході космічного польоту члени екіпажу станції можуть втрачати до 15 % ваги тіла.

Система зважування Велардо зможе доповнити вимірювач ваги «ИМ-01М». Річ не лише у тому, що для зважування людині досить буде просто проплисти перед об'єктивом. Камера не займе багато місця на станції і не вимагає багато енергії для її роботи. Такій системі можна довірити безперервний контроль за вагою усього екіпажу космічної станції.

Фахівці, проте, вказують, що мікрогравітація приводить до деякого перерозподілу води в тілах астронавтів. Так, що для визначення їх ваги на око необхідно враховувати цей ефект. Велардо, втім, зможе підкоригувати свій алгоритм. Дослідник збирається провести випробування технології у невагомості – на борту літака, що летить по параболі.

Розглядаючи безліч об'єктів, які будуть піддаватися контролю, слід зазначити, що вони є конструктивно суцільними. У об'єктів, що готуються до відправки з орбіти на Землю, є різні порожнини, що заповнені або рідким наповнювачем, або рухомими елементами. При коливаннях об'єкта такі «несуцільності» викликать дисипативні сили, які, у свою

чергу, будуть демпфувати коливання динамічної системи. У такому випадку, похибка у реальній частоті власних коливань буде досить значною, що позначиться на точності зумовлених вагових характеристик об'єкта контролю.

Вирішення даного завдання можливо на випробувальних установках, у конструкції яких враховано специфіку випробувань.

Так, наприклад, сконструйовано установку, у якій поряд з вертикальними циклічними переміщеннями об'єкт контролю обертається навколо вісі рухомого якоря динамічної системи. Основна вимога, якій мають задовольняти подібні установки, полягає у тому, що з дотримання «чистоти» експерименту, порушення динамічної системи у своїх частотах має бути безконтактним.

Найбільш просто можна визначити інерційність тіла, включивши його у коливальний процес, а як кількісний захід використовувати зміну частоти власних коливань. Вагу тіла космонавта, при цьому, можливо визначити після відповідного тарування приладу в земних умовах.

Розроблено і запропоновано пристрій для визначення ваги тіла космонавтів і об'єктів малої ваги в умовах невагомості, що представлений у вигляді пружно-вагової схеми, що зображена на рисунку 1, де: F_0 – сила попередньої натяжки пружини; C – жорсткість пружин; m – маса тіла; $P(t)$ – сила, що збуджує; X – величина відхилення від положення рівноваги.

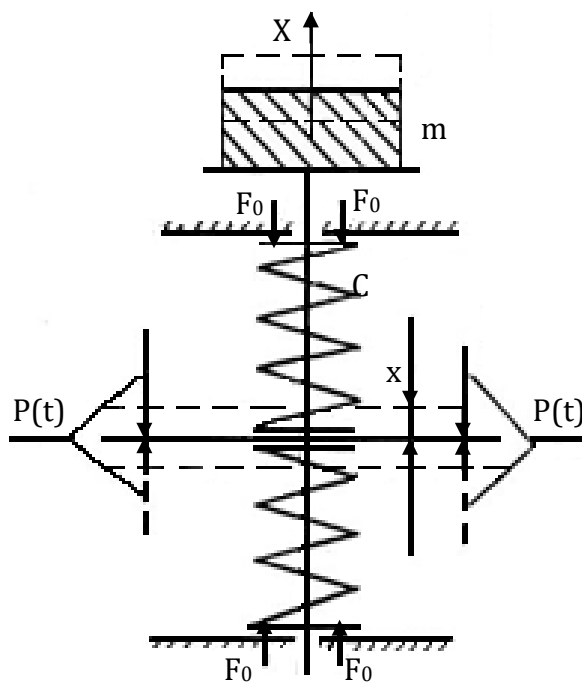


Рис. 3. Пружно-вагова схема пристрою для визначення ваги тіла космонавтів і об'єктів малої ваги в умовах невагомості

(Fig. 3. A Resiliently-gravimetric chart of device is for determining the weight of body of cosmonauts and objects small weight in the conditions of weightlessness)

Принцип дії даного пристрою заснований на зміні частоти власних коливань динамічної системи

від наявності приєднаної ваги тіла космонавта (об'єкта малої ваги). Частота власних коливань, обрана як основний діагностичний параметр, що дозволяє з високою точністю визначати вагу приєднаного до динамічної системи вантажу, що коливається.

За умови, якщо з достатньою точністю буде встановлений взаємозв'язок ваги об'єкта випробування з параметрами динамічної системи, які визначені при тарувальних випробуваннях пристрою, тоді вищезазначені цілі будуть досягнуті.

Конструкція динамічної системи, основними елементами якої є пружні елементи у вигляді металевих пружин, дозволяє проводити випробування не лише у невагомості, а й у земних умовах.

Тарування пристрою проводиться у земних умовах.

Конструктивне виконання пристрою дозволяє визначати вагу приєднаного об'єкта контролю у будь-якому положенні пристрою як «у вертикальному», так і у положенні «на боці».

Пружно-вагова схема є одноступеневим осцилятором, відносно якого можуть бути записані відповідні рівняння динаміки руху тіла космонавта вагою m .

Ідеалізація пристрою одноступеневою моделлю можлива у тому випадку, коли не враховується вплив ваги пружин та інших рухомих деталей (це має сенс, якщо вага пружин і рухомих деталей набагато менша за вагу m) та вважатиметься, що тіло m є абсолютно жорстким (коли тіло m значно жорсткіше пружин), а також суцільним, що не містить усередині рухомих елементів.

Крім того, рух тіла необхідно обмежити тільки у вертикальному напрямку, оскільки це не викликає розгойдування.

Несприятливі розгойдування у даній системі виключають рахунок великої згинальної жорсткості рухомого штока [2]. Дані припущення у реальній системі, звичайно, не можуть бути суворо дотримані.

Насправді, пружини і рухомі деталі мають вагу, а тіло m має пружність. Але, за умови якщо, з одного боку, тіло m досить жорстке і вага його більша за вагу рухомих деталей, а, з іншого боку, початкові умови сумісні з наведеними вище припущеннями, а саме – у початковий момент часу сама вага m відхилена від положення рівноваги у вертикальному напрямку або їй прикладена деяка початкова швидкість (тільки у вертикальному напрямку), тоді, при допущеній ідеалізації завдання, можливо задовільно відповісти на питання руху усієї ваги у цілому.

За умови, якщо обидві пружини попередньо напружені.

Тоді, кожна із пружин впливає на вагу m відповідно із наступною силою (рис. 3):

$$F_{C1} = F_0 + cx, F_{C2} = F_0 - cx. \quad (1)$$

Сили F_{C1} та F_{C2} спрямовані протилежно таким чином, що на вагу діє їх різниця:

$$F_C = F_{C2} - F_{C1} = -2cx. \quad (2)$$

Рівняння руху такого простого осцилятора виходить із умови рівноваги сил, що прикладені до ваги m :

$$m\ddot{x} + 2cx = P(t) - F_d, \quad (3)$$

де F_d – демпфуюча сила.

Використовуючи схему з позитивним зворотним зв'язком та при реалізації умови:

$$P(t) - F_d = 0,$$

можливо отримати рівняння вільних коливань лінійного осцилятора:

$$m\ddot{x} + 2cx = 0. \quad (4)$$

Тоді, умову рівноваги $\sum F = 0$ [1], при відомій $F = mg$, можливо записати у такому вигляді:

$$m\ddot{x} + 2cx - mg = 0. \quad (5)$$

Останній член рівняння (5) залежить від x . Його можна виключити перетворенням координат:

$$x = \xi + x_0, \quad \ddot{x} = \ddot{\xi}. \quad (6)$$

де $x_0 = \frac{mg}{2c}$ – переміщення ваги під дією g .

Отже, рівняння руху зводиться до наступного вигляду:

$$\ddot{\xi} + 2c\xi = 0. \quad (7)$$

Таким чином, рівняння (7), що описує рух осцилятора у полі тяжіння земного, аналогічно рівнянню (4). Надалі, цей результат можна використати для обґрунтування тарування приладу у земних умовах.

З теорії механічних коливань відомо, що частота власних коливань ω пов'язана з жорсткістю C пружин та вагою m наступною залежністю:

$$\omega = \sqrt{\frac{2c}{m}}. \quad (8)$$

Жорсткість C пружин можливо визначити за використанням статичної характеристики $c = \tan \alpha$ залежності $F = f(x)$ (рис. 4).

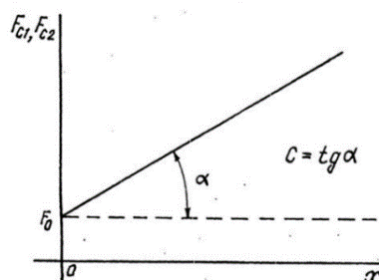


Рис. 4. Графік визначення жорсткості пружини
(Fig. 4. Graph of determination of inflexibility of spring)

При відомих жорсткості C пружин і частотах власних коливань ω вагу тіла m можливо визначити за наступною формулою:

$$m = \frac{2c}{\omega^2}. \quad (9)$$

Графічно (9) при різних C має вигляд, який представлено на рис. 5.

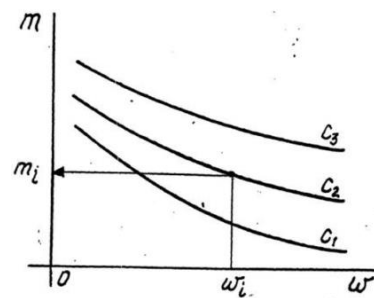


Рис. 5. Графік визначення ваги тіла
(Fig. 5. Graph of determining the weight of body)

Таким чином, за умови, якщо на контрольному приладі для даної m_i зафіксована частота ω при відомій жорсткості C , тоді величина ваги тіла m може бути визначена за монограмою (рис. 5).

Однак, прилад повинен бути попередньо відтарований у земних умовах відомою вагою $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$ при відомій жорсткості C .

За отриманими даними будується залежність

$$m = f(\omega, c),$$

характер якої приведено на рис. 6.

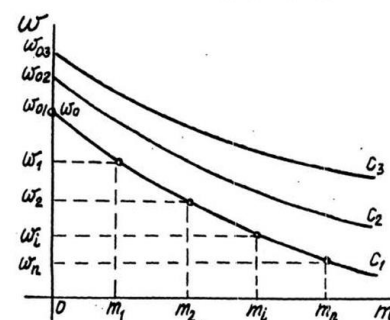


Рис. 6. Графік визначення ваги тіла
(Fig. 6. Graph of determining the weight of body)

Дані тарувальні криві, що отримані в умовах земного тяжіння, можуть надалі використовуватися без зміни для практичних цілей визначення ваги тіла космонавта в умовах невагомості.

Підвищити точність визначення ваги m можна за рахунок зміни жорсткості C . Використовуючи наведену залежність $m = f(\omega, c)$ (рис. 7), можна як визначати вагу тіла космонавта, так й контролювати його стан (неоднорідність).

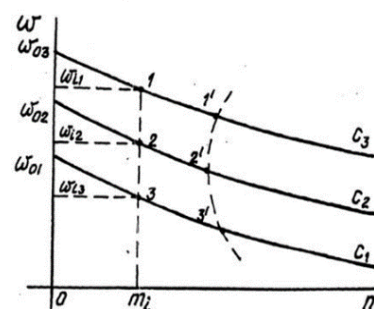


Рис. 7. Графік визначення ваги тіла
(Fig. 7. Graph of determining the weight of body)

У цьому випадку, варіюючи жорсткістю пружин, можливо отримати експериментальні точки 1, 2, 3, ..., що відповідають частотам, ω_{i1} , ω_{i2} , ω_{i3} ,

За умови, якщо експериментальні точки лежать у одній вертикалі, то, це відповідатиме вазі m_i , причому, вага m_i є суцільною – не містить усереднених рухомих елементів.

За умови, якщо тіло космонавта (об'єкт контролю) містить якісь рухомі елементи (рідина), тоді цей факт може бути встановлений тим, що точки 1¹, 2¹, 3¹, ... не будуть лежати на єдиній вертикалі, а отримають якісь відхилення від неї (рис. 7).

Наявність даного факту підтверджує невідповідність припущення про суцільність ваги m та розгляд її як одноступеневої.

У такому випадку приведення ваги m до одноступеневої можливо за умови, якщо причиною системи (із закріпленою на ній вагою m) є обертання навколо вісі рухомого стержня з одночасним збудженням власних коливань.

Тоді, дисипативні сили рухомих елементів будуть виключені за рахунок відцентрових сил, а частота власних (авторезонансних) коливань ω_i буде наближена до реальної, яка відповідатиме вазі m_i [1 – 5].

За результатами проведених досліджень розроблено експериментальну установку для визначення ваги тіла космонавтів і об'єктів малої ваги в умовах невагомості, що основана на збудженні коливань динамічної системи з власною частотою.

Зазначена експериментальна установка призначена для визначення ваги об'єкта в умовах невагомості за зміною частоти власних коливань динамічної системи залежно від ваги приєднаного вантажу та зміни жорсткісних параметрів пружних елементів.

Установка виконана на основі останніх досягнень наукової думки та може успішно застосовуватися на орбітальних космічних станціях для цілей експлуатаційних та наукових досліджень.

Розроблена динамічна система має наступні переваги. Вона дозволяє наблизити умови експерименту до умов, що близькі до експлуатаційних. Магнітодинамічна система коливань є безконтактною і, таким чином, виключає вплив системи впливу на частоту власних коливань динамічної системи, з якою жорстко пов'язаний об'єкт контролю. Це особливо важливо для «чистоти» експерименту.

Динамічні параметри реєструються системою реєстрації частоти власних (авторезонансних) коливань, що виконана з поєднанням електронно-рахункового частотоміра та бортової електронно-обчислювальної машини.

Застосування додаткових пристроїв та засобів контролю дозволяє реєструвати амплітуду коливань і енергію імпульсів, які подаються на блоки електромагнітів, що є додатковими діагностичними параметрами.

Для запису контрольованих параметрів та характеристик циклічного навантаження використовуються серійні малогабаритні прилади та блоки (наприклад, підсилювач струму низької частоти).

Отже, установка дозволяє визначати не тільки вагу об'єкта, але й стан об'єкта контролю (його неоднорідність, наявність рідкого наповнювача, частин, що коливаються тощо).

Висновки

Таким чином, для визначення інерціальної ваги тіла космонавта в умовах невагомості активно використовуються різного роду осцилятори та прилади, що дозволяють вимірювати параметри тіла, яке коливається.

Вимірювач ваги «ІМ-01М» використовує залежність періоду коливань пружини від ваги закріпленого на ній тіла космонавта (астронавта).

Даний вимірювач може бути доповнений системою зважування космонавтів (астронавтів) за методом Кармело Велардо, який дозволяє отримати дані про глибину об'єкту вимірювання (форму, розміри космонавта і рухи).

Запропоновано метод визначення ваги тіла космонавтів (астронавтів) і об'єктів малої ваги в умовах невагомості та спосіб його реалізації за зміною частоти власних коливань динамічної системи, до якої жорстко закріплено об'єкт контролю.

Розроблено пружно-ваговий пристрій для проведення вимірювань ваги об'єкта контролю. Приведено схемо-технічне рішення пристрою, як одноступеневого осцилятора, стосовно якого можуть бути записані відповідні рівняння динаміки зміни ваги тіла космонавта за часом.

Розкрито принцип дії пристрою.

Приведені аналітичні вирази для визначення ваги тіла космонавта з урахуванням частоти власних коливань та жорсткості пружин.

Представлено отримані графіки за проведеннями розрахунками.

Розроблено експериментальну установку для визначення ваги тіла космонавтів і об'єкта малої ваги в умовах невагомості, що застосовує як діагностичний параметр частоту власних коливань.

Установка дозволяє визначати вагу об'єкта контролю і його стан (неоднорідність, наявність рідкого наповнювача, частин, що коливаються тощо).

Дана установка може бути застосована на орбітальних космічних станціях.

REFERENCES

1. Eiderman, V.L. (1980), *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Theory of mechanical oscillations], Higher school, Moscow, 408 p.
2. Ananiev, I.V. & Colvin, N.M. (1969), *Vliyaniye mestnoy zhestkosti sterzhney na chastotu sobstvennykh kolebaniy* [Influence of local rigidity of rods on the frequency of natural oscillations], Aviation industry, 120 c.

3. Mikishev, G.N. & Rabinovich, B.I. (1968), *Dinamika tverdogo tela s polostyami, chastichno zapolnennymi zhidkost'yu* [Dynamics of a rigid body with cavities partially filled with liquid], Mashinostroenie, Moscow, 532 p.
4. Rumyantsev V.V. (1957), *Ustoychivost' vrashcheniya tverdogo tela s ellipsoidal'noy polost'yu, napolnennoy zhidkost'yu* [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), "Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов [Vol. 3. Oscillations of machines, structures and their elements]", *Vibratsiya v tekhnike* [Vibration in technology]: Handbook in 6 volumes, Mashinostroenie, Moscow, 544 p.
6. Chandaeva, S.A. (1994), *Physics and people*, AT "Aspect Press", Moscow, 136 p.
7. (2021), *Vaha tila i nevahomist'* [Body weight and weightlessness], available at: <http://um.co.ua/13/13-7/13-72477.html>.
8. (2021), *Kosmicheskiye vesy* [Space scales], available at: <https://habr.com/ru/post/379349/>.
9. (2021), *Kak vzveshivayut lyudey v nevesomosti na MKS* [How people are weighed in zero gravity on the ISS], available at: https://pikabu.ru/story/kak_vzveshivayut_lyudey_v_nevesomosti_na_mks_6083503.
10. (2021), *Izobreten beskontaktnyy sposob vzveshivaniya lyudey v nevesomosti* [Invented a non-contact method of weighing people in zero gravity], available at: <https://www.unn.com.ua/ru/news/573532-vinaydeno-bezkontaktniy-sposib-zvageuvannya-lyudey-v-nevagomosti>.
11. (2021), *Izmeritel massy tela v nevesomosti* [Weightless body mass meter], available at: http://wiki-org.ru/wiki/Измеритель_массы_тела_в_невесомости.
12. Bezrodny D.A. (2017), *Hravimetriya. Knyha 1. Teoretychni osnovy hravimetriyi* [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>.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Еидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
2. Ананьев И.В., Колвин Н.М. Влияние местной жесткости стержней на частоту собственных колебаний. М.: Авиапромышленность, 1969. 120 с.
3. Микишев Г.Н., Рабинович Б.И. Динамика твердого тела с полостями, частично заполненными жидкостью. М.: Машиностроение, 1968. 532 с.
4. Румянцев В.В. Устойчивость вращения твердого тела с эллипсоидальной полостью, наполненной жидкостью. Прикладная математика и механика. 1957. Т. 21, вып. 6. С. 740-748.
5. Вибрация в технике. Справочник в 6 томах. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. М.: Машиностроение, 1980. 544 с.
6. Чандаева С. А. Физика і человек. М.: АТ «Аспект Пресс», 1994. 136 с.
7. Вага тіла і невагомість. 2021. URL: <http://um.co.ua/13/13-7/13-72477.html>.
8. Космические веса. 2021. URL: <https://habr.com/ru/post/379349/>.
9. Как взвешивают людей в невесомости на МКС. 2021. URL: https://pikabu.ru/story/kak_vzveshivayut_lyudey_v_nevesomosti_na_mks_6083503.
10. Изобретен бесконтактный способ взвешивания людей в невесомости. 2021. URL: <https://www.unn.com.ua/ru/news/573532-vinaydeno-bezkontaktniy-sposib-zvageuvannya-lyudey-v-nevagomosti>.
11. Измеритель массы тела в невесомости. 2021. URL: http://wiki-org.ru/wiki/Измеритель_массы_тела_в_невесомости.
12. Безродний Д.А. Гравіметрія. Книга 1. Теоретичні основи гравіметрії. К.: КНУ імені Тараса Шевченка, 2017. 188 с. URL: <http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/gravimetriya1.pdf>.

Received (Надійшла) 14.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.05.2022

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» of National Technical University is the «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;
Volodumyr Komarov – candidate of technical sciences, Chief of research department of the 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 Dmitriyev – Doctor of technical sciences, associate professor, the head of department of 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;

Volodumyr Pustovarov – candidate of technical sciences, chief of group of the Kharkov 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, Чернігів, Україна;

Ruslan Oliinyk – Chief of Section of 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>.

Method for controlling the frequency of eigentones for determination of the astronaut's body weight and small weight in weightlessness

Oleksii Kolomiitsev, Volodumyr Komarov, Oleh Dmitriyev, Volodumyr Pustovarov, Ruslan Oliinyk

Abstract. In the article the analysis of existent basic methods of determining the weight of body of cosmonauts and objects small weight is conducted in the conditions of weightlessness, and their features of application are similarly exposed. The most comfortable and perspective method of determining the inertial weight of body in the conditions of weightlessness the use of different sort of oscillators and devices, that allow to measure the parameters of body of cosmonaut (small weight of devices and others like that), that hesitates, is considered. It is possible to use dependence of period of vibrations of spring on b.w. of cosmonaut envisaged on her and others like that. The measuring device of weight of «ИМ-01М», his technical descriptions, composition and principle of action, is considered. Such measuring device it may be to complement the system of weighing of astronauts and cosmonauts on the method of Karmelo Velardo, that allows to get measuring (form and sizes of cosmonaut and his motions) given about the depth of object. **The object of research** is oscillators and devices, that allow to measure parameters bodies of cosmonaut and objects small weight, that hesitate. **The subject of research** is a mathematical vehicle on determination of frequency of eigentones dynamic system. **The research aims** is development of method of control of frequency of eigentones for determining the weight of body of cosmonaut and objects small weight in the conditions of weightlessness. **Conclusions.** The method of determining the weight of body of cosmonauts and objects small weight in the conditions of weightlessness and method of his realization are offered on the change of frequency of eigentones dynamic system devices. Analytical expressions for the calculation of frequency of eigentones dynamic system devices and corresponding charts are presented. A spring-gravimetric device is worked out for realization of measuring. A chart technical decision over of device is brought, his composition and principle of action are exposed. A device is able to define weight of control object, his state (his heterogeneity, presence of liquid filler, parts that hesitate and others like that).

Keywords: weightlessness; bodyweight of cosmonaut; dynamic system, frequency of eigentones; oneseated oscillator; spring-gravimetric device.

Метод контроля частоты собственных колебаний для определения массы тела космонавта и малых масс в условиях невесомости

А. В. Колосийцев, В. А. Комаров, О. Н. Дмитриев, В. В. Пустоваров, Р. М. Олейник

Аннотация. В статье проведен анализ существующих основных методов определения массы тела космонавтов и объектов малых масс в условиях невесомости, а также раскрыты их особенности применения. Наиболее удобным и перспективным способом определения инерциальной массы тела в условиях невесомости считается использование разного рода осцилляторов и приборов, позволяющих измерять параметры колеблющегося тела космонавта (малой массы приборов и т.д.). Можно использовать зависимость периода колебаний пружины от массы тела космонавта, закрепленного на ней и т.д. Рассмотрен измеритель массы «ИМ-01М», его технические характеристики, состав и принцип действия. Такой измеритель, возможно, может быть дополнен системой взвешивания астронавтов и космонавтов по методу Кармело Велардо, который позволяет получить данные о глубине объекта измерения (форму и размеры космонавта и его движения). **Объектом исследования** являются осцилляторы и приборы, которые позволяют измерять параметры колеблющегося тела космонавта и объектов малых масс. **Предметом исследования** является математический аппарат определения частоты собственных колебаний динамической системы. **Целью научной работы** является разработка метода контроля частоты собственных колебаний для определения массы тела космонавта и объектов малых масс в условиях невесомости. **Выводы.** Предложен метод определения массы тела космонавтов и объектов малой массы в условиях невесомости и способ его реализации по изменению частоты собственных колебаний динамической системы устройства. Представлены аналитические выражения для расчета частоты собственных колебаний динамической системы устройства и соответствующие графики. Разработано пружинно-весовое устройство для проведения измерений. Приведено схемо-техническое решение устройства, раскрыт его состав и принцип действия. Устройство способно определить массу объекта контроля, его состояние (неоднородность, наличие жидкого наполнителя, частей, которые колеблются и т.д.).

Ключевые слова: невесомость; вес тела космонавта; динамическая система; частота собственных колебаний; одностепенной осциллятор; пружинно-весовое устройство.

Т. В. Смірнова

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПІДКЛЮЧЕННЯ ВУЗЛІВ ДО ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПІДПРИЄМСТВА НА БАЗІ 5G

Анотація. Об'єктом дослідження є процес побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи автоматизації виробничих процесів. Предметом дослідження є метод забезпечення надійності підключення вузлів до інформаційно-комунікаційної системи підприємства на базі 5G. Метою даної роботи є підвищення надійності підключення вузлів до інформаційно-комунікаційної системи підприємства на базі 5G. для оптимізації виробничих процесів. У результаті дослідження були розглянуті поняття, що характеризують надійність розподілених інформаційно-комунікаційних мереж 5G. Було формалізована постановка синтезу функціонально стійкої структури розподіленої інформаційно-комунікаційної мережі 5G підприємства. Також було розроблено метод планування мережі 5G для автоматизації виробничих процесів підприємства, що полягає в послідовному забезпеченні проектування покриття радіомережі із визначення місця розташування кожної базової станції з використанням оптимізованої моделі оцінки втрат потужності радіосигналу на шляху розповсюдження з урахуванням обмежень по мінімальній пропускній здатності, кількості підключень та надійності та побудови комунікаційного транспортного сегменту із визначенням оптимального місцезнаходження кросових приміщень. **Висновки.** Розроблений метод надає змогу проводити планування оптимальної структури стільникової мережі 5G для оптимізації виробничих процесів, оцінювати та зменшувати сукупні витрати на побудову мережі, при цьому забезпечуючи необхідні показники якості обслуговування вузлів мережі та її надійності.

Ключові слова: надійність; інформаційно-комунікаційна система; 5G.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні автоматизовані системи керування на виробництві включають в себе технології на базі безпроводових мереж та хмарні технології [1-3].

Як показав аналіз функціонування розподілених безпроводових мереж, у тому числі й стільникових мереж 5G, елементи систем, до яких відносяться вузли комутації та лінії зв'язку між ними, схильні до безлічі внутрішніх (відмови, збої, помилки обслуговуючого персоналу) та зовнішніх (пошкодження, перешкоди, несанкціонований доступ) дестабілізуючих впливів. Тому забезпечення функціональної стійкості елементів розподілених інформаційно-комунікаційних мереж 5G є дуже актуальною підзадачею, яка обов'язково має бути вирішена.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розробки методу забезпечення надійності підключення вузлів до інформаційно-комунікаційної системи (ІКС) підприємства на базі 5G у даній роботі був проведений аналіз останніх досліджень і публікацій у сфері реалізації бездротового зв'язку. У роботі [4] визначено поняття ефективності інформаційно-комунікаційної мережі. Опис існуючих технологій бездротового зв'язку, які можливо застосувати для побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи автоматизації виробничих процесів наведено у роботах [5-13]. У роботах [5, 6] розглянута специфікація LoRaWAN, у роботі [7] розглянута специфікація мережі IEEE 802.15.4-2011, у роботі [8] розглянута специфікація IEEE 802.15 WPAN, у роботах [9, 10] розглянута специфікація Wi-Fi 6, у роботах [11-13] розглянута специфікація 5G.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення роботи отримані з використанням методів

теорії оптимізації, теорії складних систем, теорії телекомунікацій, теорії надійності.

Об'єктом дослідження є процес побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи автоматизації виробничих процесів.

Предметом дослідження є метод забезпечення надійності підключення вузлів до інформаційно-комунікаційної системи підприємства на базі 5G.

Тому **метою** даної роботи є підвищення надійності підключення вузлів до інформаційно-комунікаційної системи підприємства на базі 5G. для оптимізації виробничих процесів.

Узагальнена модель оцінки ефективності інформаційно-комунікаційних мереж

Ефективність інформаційно-комунікаційної мережі – це її здатність досягати поставленої мети у заданих умовах функціонування з певним рівнем якості, тобто це характеристика, що відображає ступінь відповідності мережі своєму призначенню, технічну досконалість та економічну доцільність [4].

Поняття ефективності пов'язані з отриманням деякого корисного результату – ефекту використання інформаційно-комунікаційних мереж, який досягається ціною витрат певних ресурсів, тому ефективність мережі можна розглядати як співвідношення між ефектом (виграшем) і витратами.

Показник ефективності мережі – кількісна характеристика інформаційної мережі, що розглядається стосовно певних умов її функціонування.

Оцінюючи ефективність інформаційної мережі необхідно враховувати характеристики праці людини, взаємодіючого з комп'ютерною технікою та іншим технічними засобами мережі (засобами автоматизації).

Будемо визначати показник ефективності інформаційної мережі процесом її функціонування та відповідно функціоналом від цього процесу.

Загалом:

$$W = W(t, L_K, L_{TP}, L_A, L_D, L_Y),$$

де W – множина показників ефективності мережі; t – час; $L_K, L_{TP}, L_A, L_D, L_Y$ – множина параметрів відповідно до входних потоків запитів на обслуговування користувачів (L_K); технічних та програмних засобів мережі (L_{TP}); алгоритмів обробки та передачі інформації в мережі (L_A); діяльності користувачів (L_D); умов функціонування мережі (L_Y).

В свою чергу:

$$L_D = \{L_T, L_{TM}, L_H\},$$

де L_T, L_{TM}, L_H – множина вихідних показників діяльності вузлів інформаційної мережі відповідно до точісних (L_T), часових (L_{TM}), надійнісних (L_H).

Значення компонентів множин L_T, L_{TM}, L_H визначаються конкретними процесами діяльності вузлів у розглянутій інформаційно-комунікаційній мережі, засобами, які є в їхньому розпорядженні для виконання своїх функцій та умовами роботи. Відповідно до конкретизації поняття ефективності, показники множини можна розділити на три групи:

$$W = \{W_U, W_T, W_E\},$$

де W_U – показники цільової ефективності інформаційно-комунікаційної мережі або ефективності використання (цільового застосування) цієї мережі, це кількісний показник відповідності мережі своєму призначенню;

W_T – показники технічної ефективності інформаційно-комунікаційної мережі, це кількісна міра, що відображає технічну досконалість мережі;

W_E – показники економічної ефективності інформаційно-комунікаційної мережі, це кількісний показник економічної доцільності розгортання мережі.

В рамках даного підрозділу проведемо багатокритеріальний аналіз безпроводових технологій, які можуть бути використані для підтримки автоматизації виробничих процесів великих підприємств.

Для цього будемо користуватись переліком показників цільової (Пропускна здатність R , Затримка $t_{затр}$, Ємність мережі C , Щільність підключення пристроїв ν) та технічної (Енергетична ефективність e , Безпека мережі IS) ефективності.

В даний час існує безліч безпроводових технологій, найчастіше відомих користувачам за їх маркетинговими назвами.

Використовуючи безпроводові рішення, є можливість створювати надійні та високопродуктивні корпоративні мережі, використання яких значно розширює можливості підприємства для доступу до мережі Інтернет, економічного телефонного зв'язку (IP-телефонії), охорони приміщень та об'єктів з використанням відеоспостереження та інших засобів охоронної та пожежної сигналізації, систем контролю та автоматизації технологічних процесів промислових підприємств, систем моніторингу показників довкілля та інших цілей, пов'язаних з телеметричною передачею даних.

Сучасні рішення для безпроводових мереж забезпечують високу керованість, автоматизацію та захищеність IT-інфраструктури. Кожна технологія має певні характеристики, які визначають її сферу застосування.

Був проведений аналіз та здійснено відповідний вибір оптимальної технології для використання її з метою оптимізації виробничих процесів. Для цього було розроблено модель багатокритеріальної оптимізації, визначено пул комунікаційних технологій, які можуть бути використані для оптимізації виробничих процесів.

В результаті, проведений багатокритеріальний аналіз дозволив впевнитись в доцільності розгортання стільникових мереж 5G для автоматизації виробничих процесів.

Поняття, що характеризують надійність розподілених інформаційно-комунікаційних мереж 5G

Під відмовою будемо розуміти подію, під час якої певний елемент ІКС (вузол комутації чи лінія зв'язку) втрачає здатність виконувати функції з обробки та передачі інформації [24]. Тоді, під відновленням будемо розуміти подію, що полягає в тому, що елемент ІКС, що відмовив, повністю набув здатності виконувати задані функції з обробки та передачі інформації. Імовірність безвідмовної роботи $r(t)$ характеризується продуктивністю елемента ІКС $\omega(t)$ у заданому проміжку часу $(0, t)$:

$$r(t) = P\{\forall \tau \in [0, t) \rightarrow \omega(\tau) = 1\},$$

де $\omega(t) = 1$, якщо при $t \geq 0$, елемент ІКС перебуває у працездатному стані;

$\omega(t) = 0$, якщо при $t \geq 0$, елемент ІКС перебуває у непрацездатному стані.

Імовірністю відновлення елемента ІКС, що відмовив, може бути оцінена за допомогою формули:

$$u(t) = 1 - P\{\forall \tau \in [0, t) \rightarrow \omega(\tau) = 0\},$$

де $P\{\forall \tau \in [0, t) \rightarrow \omega(\tau) = 0\}$ – ймовірність того, що (при виконанні відновлювальних робіт) для кожного τ , що належить проміжку часу $[0, t)$, продуктивність $\omega(\tau)$ залишається рівною нулю і характеризує можливість елемента ІКС по досягненню заданої продуктивності після відмови.

Для характеристики продуктивності $\omega(t)$ в момент часу $t \geq 0$ (включаючи $t \rightarrow \infty$) служить функція готовності:

$$s(i, t) = p_1(i, t) = P\{i: \omega(t) = 1\}, \quad (1)$$

де $P\{i: \omega(t) = 1\}$ – ймовірність того, що в умовах потоку відмов та відновлень елемент, який почав функціонувати в стані $i \in E_0$, матиме при $t > 0$ продуктивність, рівну потенційно можливою;

$E_0 = \{0, 1\}$ – множина станів елемента ІКС;

$i = 0$ – відмова;

$i = 1$ – працездатний стан;

$P_j(i, t)$ – ймовірність знаходження елемента в момент $t \geq 0$ у стані $j \in E_0$ за умови, що її початковим був стан $i \in E_0$.

Формалізована постановка синтезу функціонально стійкої структури розподіленої інформаційно-комунікаційної мережі 5G підприємства

Є N вузлів комутації ІКС, розташування яких задано просторовими координатами.

Обмін інформацією між вузлами здійснюється згідно з матрицею інтенсивностей $H = ||h_{ij}||$ розміру $N \times N$, де h_{ij} – обсяг інформації, що передається від абонента i до абонента j в одиницю часу, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, N$, $i \neq j$.

Задані обмеження.

Відома функція вартості ІКС – C та визначено допустимі витрати на її створення та експлуатацію $C_{\text{Дод.}}$.

Задані також необхідні ймовірності зв'язності $P_{\text{необх}}$ для кожної пари вузлів комутації.

Потрібно визначити структуру ІКС, яка має максимальний рівень функціональної стійкості $F_{\text{ІКС}}$, що залежить від ймовірності зв'язності P_{ij} , при заданих обмеженнях на витрати для створення та експлуатації мережі, а також інші параметри функціонування системи.

Математична модель завдання виглядає наступним чином:

$$F_{\text{ІКС}} = f(P_{ij}) \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$i, j = 1, \dots, N, \quad i \neq j;$$

$$C = \sum_i \sum_j C_{ij}(l_{ij}, \rho_{ij}, h_{ij}) \leq C_{\text{Дод.}} \quad (3)$$

$$\forall_{ij} \quad P_{ij} \geq P_{\text{необх}} \quad (4)$$

$$\phi_{ij} \leq \rho_{ij} \cdot \quad (5)$$

$$\tau_{cp} \leq T_{\text{max}} \cdot \quad (6)$$

де N – число вузлів комутації ІКС, що синтезується.

У загальному випадку $N = \text{var}$;

$F_{\text{ІКС}}$ – функціонал якості, що максимізується;

P_{ij} – ймовірність зв'язків між парою (i, j) абонентів мережі;

l_{ij} – довжина лінії зв'язку між абонентами (i, j) ;

τ_{cp} – середній час затримки повідомлення, що пересилається від одного абонента до іншого.

Введемо показники функціональної стійкості такі, як:

– ступінь вершинної зв'язності $\chi(G)$;

– ступінь реберної зв'язності $\lambda(G)$ графа структури ІКС.

Дослідження показують, що функціональна стійкість ІКС може бути охарактеризована і низкою інших показників [15, 16]:

– наявністю у заданих двополюсних ІКС шляхів зв'язку;

– математичним сподіванням числа цих шляхів;

– відношенням числа справних ребер до загального їх числа;

– потужністю мінімальної простої сікучої множини;

– ймовірністю зв'язності P_{ij} та ін.

За показниками $\chi(G)$ та $\lambda(G)$ можна визначити, чи належить система області функціональної стійкості чи області функціональної нестійкості (НФУ).

За ймовірністю зв'язків можна врахувати також інші параметри якості функціонування ІКС.

Переваги при використанні ймовірності зв'язності як показника ФУ полягають у тому, що з'являється можливість врахувати:

– надійність комутаційного обладнання;

– вид фізичного каналу передачі інформації;

– наявність резервних каналів та маршрутів передачі інформації;

– ступінь зв'язності розподіленої структури.

Для визначення показника функціональної стійкої структури мережі 5G скористаємося методом прямого перебору станів елементів.

Аналізуючи події зв'язності $E_{x,y}$ та незв'язності $\bar{E}_{x,y}$ у ІКС [14], можна бачити, що першому відповідає подія існування хоча б одного простого ланцюга (ПЛ), а другому – хоча б однієї простої сікучої множини (ПСМ).

При цьому елементи графа, що не входять ні до ПЛ, ні до ПСМ, можуть бути в будь-якому з трьох станів: справному, несправному та нейтральному. Це положення записується таким чином:

$$E_{x,y} \Rightarrow \exists \mu_i \in M_{x,y} \left[\mu_i / \forall d_j \in D \left[\bar{d}_j \vee \bar{d}_j \vee \bar{d}_j \right] \right], \quad (7)$$

$$\bar{E}_{x,y} \Rightarrow \exists s_i \in S_{x,y} \left[s_i / \forall d_j \in D \left[\bar{d}_j \vee \bar{d}_j \vee \bar{d}_j \right] \right]. \quad (8)$$

З наведених формул видно, що ті чи інші стани всіх елементів графа однозначно відповідають події або зв'язності або незв'язності в ІКС.

Кількість можливих станів елементів графа щодо v_x та v_y дорівнює 2η , де $\eta = m_{D-2}$.

На рис. 1 представлений граф ІКС із $m_D = 7$, на якому задана ІКС виду $v_{x=1}$ та $v_{y=4}$.

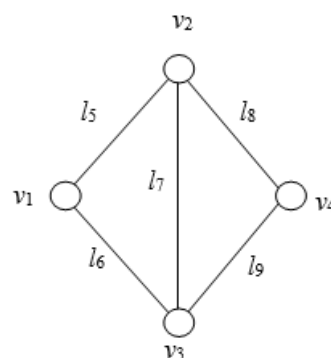


Рис. 1. Граф елементарної структури ІКС
(Fig. 1. Graph of the elementary structure of PIC)

Припустимо, що вузли комутації в наведений ІКС безвідмовні $p(v_i) = 1$, а надійність ЛЗ визначається ймовірністю передачі інформації (справного стану) $p(l_i) = 1 - q(l_i)$.

У цьому випадку граф матиме $m_L = 5$ елементів, а число всіх можливих станів графа дорівнюватиме $2^5 = 32$, (табл. 1).

Таблиця 1 – Конституенти щодо елементів

№	Конституенти щодо елементів					$E_{1,4}$	$\bar{E}_{1,4}$
	l_5	l_6	l_7	l_8	l_9		
1	0	0	0	0	0		+
2	0	0	0	0	1		+
3	0	0	0	1	0		+
4	0	0	0	1	1		+
5	0	0	1	0	0		+
6	0	0	1	0	1		+
7	0	0	1	1	0		+
8	0	0	1	1	1		+
9	0	1	0	0	0		+
10	0	1	0	0	1	+	
11	0	1	0	1	0		+
12	0	1	0	1	1	+	
13	0	1	1	0	0		+
14	0	1	1	0	1	+	
15	0	1	1	1	0	+	
16	0	1	1	1	1	+	
17	1	0	0	0	0		+
18	1	0	0	0	1		+
19	1	0	0	1	0	+	
20	1	0	0	1	1	+	
21	1	0	1	0	0		+
22	1	0	1	0	1	+	
23	1	0	1	1	0	+	
24	1	0	1	1	1	+	
25	1	1	0	0	0		+
26	1	1	0	0	1	+	
27	1	1	0	1	0	+	
28	1	1	0	1	1	+	
29	1	1	1	0	0		+
30	1	1	1	0	1	+	
31	1	1	1	1	0	+	
32	1	1	1	1	1	+	

Визначення показника функціональної стійкості структури, наведеної на рис. 1. Справному стану елемента відповідає значення булевої змінної 1, а несправному – 0. Символом «+» відзначені конституенти (тобто стану елементів графа), що відповідають подіям зв'язності та незв'язності.

Неважко бачити, що події зв'язності $E_{x,y}$ відповідає 16 станів, а незв'язності $\bar{E}_{x,y}$, також 16. Логічний добуток булевих змінних елементів графа є конституентою. Сума конституент є досконалою нормальною диз'юнктивною формою (ДНДФ) логічних висловлювань про стани елементів графа. Множина конституент позначається символом $K_{x,y} = \{k_i\}$, її потужність – символом m_K . Якщо замінити у конституентах i -ю булеву змінну, рівну 1 чи 0, на p_i чи q_i відповідно, використовуючи частину ДНДФ, що позначається символом $K_{x,y}$, конституенти якої відповідають події $E_{x,y}$, можна обчислити точне значення ймовірності зв'язності v_x і v_y , а використовуючи частину, що позначається $\bar{K}_{x,y}$, – точне значення ймовірності незв'язності цих же вершин.

Надалі умовимося замість значень i -ї булевої змінної 1 та 0 використовувати символ самого i -го елемента відповідно як d_i (або $\bar{d}_i$) і $\bar{d}_i$.

За наявності пронумерованого графа для цієї ж мети використовується і номер i -го елемента, тобто i (чи $\bar{i}$) та i . Наприклад, конституента 4 з табл. 1 може бути записана у вигляді:

$$k_4 = \{ \bar{5} \cdot \bar{6} \cdot \bar{7} \cdot 8 \cdot 9 \}.$$

Значення ймовірності цієї конституенти:

$$P(k_4) = q_5 \cdot q_6 \cdot q_7 \cdot p_8 \cdot p_9.$$

Неважко бачити, що будь-яка конституента з підмножини $K_{x,y} = \{k_i\}$ містить у собі хоча б один ПЛ, а з підмножини – $\bar{K}_{x,y} = \{\bar{k}_i\}$ хоча б одне ПСМ.

Наприклад, в табл.1, k_{10} містить ПЦ виду $\mu_i = \{6, 9\}$, а k_{11} – ПСМ виду $s_i = \{5, 7, 9\}$.

Визначити значення ймовірності зв'язності можливо таким чином :

$$P_{x,y} = \sum_{i, k_i \in K_{x,y}} \prod_{j=1}^n r_j, \quad r_j = \begin{cases} p_j, & \text{при } k_{ij} = 1; \\ q_j, & \text{при } k_{ij} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Аналогічним чином можна обчислити значення $\bar{P}_{x,y}$, підсумовуючи конституенти, що належать безлічі $\bar{K}_{x,y}$.

Для спрощення обчислень можна скористатися методами мінімізації СДНФ, у яких отримуємо суму склеєних конституент.

Застосовуючи (9) для СДНФ у табл. 1, з урахуванням $p_i = p$, $q_i = q$, після перетворень отримуємо:

$$P_{1,4} = p^2(1+q^2) + 2p^3(q+q^2). \quad (10)$$

До особливостей описаного методу визначення показника функціональної стійкості слід зарахувати:

– метод не має аналітичного рішення в квадратах і досить складно алгоритмізується, не дивлячись на його простоту;

– обчислювальна складність алгоритму $O(2^n)$, що дозволяє віднести його до класу неполіноміальних завдань;

– метод прийнятний для аналітичних розрахунків простих структур, а також для підтвердження достовірності рішень, одержаних іншими методами.

Таким чином, математичний апарат, розглянутий в даній роботі, необхідно використовувати для оцінки функціональної стійкості структури мережі 5G, побудованої для підприємства. В разі недостатнього рівня даного показника, необхідно використовувати різні види надмірності: функціональної, алгоритмічної, технічної (апаратної та програмної), топологічної – та організація її у вигляді дублюючих чи мажоритарних структур із голосуванням.

Висновки

Було розроблено метод планування мережі 5G для автоматизації виробничих процесів підприємства, що полягає в послідовному забезпеченні проектування покриття радіомережі із визначення місця розташування кожної базової станції з використанням

оптимізованої моделі оцінки втрат потужності радіо-сигналу на шляху розповсюдження з урахуванням обмежень по мінімальній пропускній здатності, кількості підключень та надійності та побудови комунікаційного транспортного сегменту із визначенням оптимального місцезнаходження кросових приміщень.

Розроблений метод надає змогу проводити планування оптимальної структури стільникової мережі 5G для оптимізації виробничих процесів, оцінювати та зменшувати сукупні витрати на побудову мережі, при цьому забезпечуючи необхідні показники якості обслуговування вузлів мережі та її надійності.

REFERENCES

- Smirnova, T.V., Solovykh, Je.K., Smirnov, O.A. & Drjejev, O.M. (2019), "Pobudova khmarnykh informacijnykh tekhnologijh optymizaciji tekhnologichnogho procesu vidnovlennja ta zmicennja poverkhonj detalej [Construction of cloud information technologies to optimize the technological process of restoration and strengthening of surface surfaces]", *Centralnoukrajinskijj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky*, No. 1(32), pp. 184-194.
- Smirnova, T.V., Smirnov, S.A., Mynajlenko, R.M., Dorenskyj, O.P. & Sysojenko, S.V. (2020), "Khmarina avtomatyzovana systema intelektualnoji pidtrymky pryjnjattja rishenj dlja tekhnologichnykh procesiv». [Cloud automated system of intelligent decision support for technological processes]", *Visnyk Cherkaskogho derzhavnogho tekhnologichnogho universytetu. Tekhnichni nauky*. No. 4, pp. 84-92.
- Smirnova, T.V., Stoljarenko, M.P., Jankov, M.O., Ghrudik, V.V., Motorin & Ju.Ju (2021), "Modelj realizaciji struktury tekhnologichnogho procesu u khmarnomu servisi». [Model of realization of structure of technological process in cloud service]", *Zbirnyk naukovykh pracj Kharkivskogho nacionalnogho universytetu Povitrjanykh Syl*, No. 4(70), pp. 132-142.
- Davydov A.V., Kuklin V.V. & Khaidarov K.A. (2021), *Methods for evaluating the effectiveness of information networks*, available at: <http://bourabai.ru/telecom/nets21.htm>
- (2022), AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, 2015 Semtech Corporation.
- (2015), LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January.
- Standards (2011), *IEEE 802.15.4-2011 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.6012487>
- (2022), *IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4zEnhanced Impulse Radio*, available at: <https://www.ieee802.org/15/pub/TG4z.html>
- Ram Krishan (2019), "Wi-Fi 6 Technology-A Review", *International Journal of Modern Electronics and Communication Engineering (IJMECE)*, Vol. 7, Issue 4, July 2019, pp. 11-13.
- (2022), *Intel Communities*, available at: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/gaming/resources/wifi-6.html>
- ITU (2020), *ITU towards "IMT for 2020 and beyond" – IMT-2020 standards for 5G*, available at: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>
- Cisco public (2021), *Reimagining the End-to-End Mobile Network in the 5G Era*, White paper, available at: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/cloud-systems-management/elastic-services-controller-esc/reimagining-mobile-network-white-paper.pdf>
- Stelmakh, S. (2022), *How to configure an edge data center*, available at: <https://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID = 216820>
- Khoroshevskij, V.Gh. (1987), *Ynzhenernyj analiz funkcyonirovaniya vuchyslyteljnykh mashyn y system [Engineering analysis of the operation of computers and systems]*, Radio y svjaz, Moscow, 156 p.
- Barabash, O.V. & Mashkov, O.A. (2004), "Vyznachennja kryterijiv i zapasu funkcionalnoji stijkosti rozpodilenoji informacijnoji systemy [Determining the criteria and margin of functional stability of a distributed information system]", *Aktualjni problemy stvorennja i zastosuvannja aviacijnykh ta kosmichnykh system: Zbirnyk naukovykh pracj NAOU, NAOU*, Kyiv, pp. 62 – 65.
- Barabash, O.V. (2004), "Zabezpechennja funkcionalnoji stijkosti rozpodilenoji informacijnoji kosmichnoji systemy [Ensuring the functional stability of a distributed space information system]", *Systemy obrobky informacii*, Is. 1, KhVU, Kharkiv, pp. 3 – 12.
- Fylyn, B.P. (1988), *Metody analiza strukturnoj nadezhnosity setej svjazy [Methods of analysis of structural reliability of communication networks]*, Radio y svjaz, Moscow, 204 p.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Смірнова Т.В., Солових Є.К., Смірнов О.А., Дресєв О.М. Побудова хмарних інформаційних технологій оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019, № 1(32). С. 184-194.
- Смірнова Т.В., Смірнов С.А., Минайленко Р.М., Доренський О.П., Сисоєнко С.В. Хмарна автоматизована система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для технологічних процесів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. 2020. №4. С. 84-92.
- Смірнова Т.В., Столяренко М.П., Янков М.О., Грудік В.В., Моторін Ю.Ю. Модель реалізації структури технологічного процесу у хмарному сервісі. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. № 4(70). С. 132-142.
- Давыдов А.В., Куклин В.В., Хайдаров К.А. Методы оценки эффективности информационных сетей. 2021. URL: <http://bourabai.ru/telecom/nets21.htm>
- AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, 2015 Semtech Corporation/
- LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January.
- IEEE 802.15.4-2011 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs): Standards, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.6012487>

8. IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4zEnhanced Impulse Radio. 2022. URL: <https://www.ieee802.org/15/pub/TG4z.html>
9. Ram Krishan. Wi-Fi 6 Technology-A Review. International Journal of Modern Electronics and Communication Engineering (IJMECE), Vol. 7, Issue 4, July 2019. Н. 11-13.
10. Intel Communities, 2022, URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/gaming/resources/wifi-6.html>
11. ITU towards “IMT for 2020 and beyond” – IMT-2020 standards for 5G. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>
12. Reimagining the End-to-End Mobile Network in the 5G Era. White paper, Cisco public, 16 p., URL: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/cloud-systems-management/elastic-services-controller-esc/reimagining-mobile-network-white-paper.pdf>
13. Стельмах, С. (2022). Как сконфигурировать периферийный ЦОД. 2022, URL: <https://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID = 216820>
14. Хорошевский В.Г. Инженерный анализ функционирования вычислительных машин и систем. М.: Радио и связь, 1987. 156 с.
15. Барабаш О.В., Машков О.А. Визначення критеріїв і запасу функціональної стійкості розподіленої інформаційної системи. Матеріали науково-практичної конференції «Актуальні проблеми створення і застосування авіаційних та космічних систем». К.: НАОУ, 2004. С. 62 – 65.
16. Барабаш О.В. Забезпечення функціональної стійкості розподіленої інформаційної космічної системи. Системи обробки інформації. Х.: ХВУ, 2004. Вип. 1. С. 3 – 12.
17. Филин Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь, 1988. 204 с.

Received (Надійшла) 23.02.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.04.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Смірнова Тетяна Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Tetiana Smirnova – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;

e-mail: sm.tetyana@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6896-0612>

Method of ensuring the reliability of connecting nodes to the information and communication system of the enterprise based on 5G

Tetiana Smirnova

Abstract. The object of research is the process of building a cloud information and communication system for automation of production processes. The subject of the research is the method of ensuring the reliability of connection of nodes to the information and communication system of the enterprise on the basis of 5G. The purpose of this work is to increase the reliability of connecting nodes to the information and communication system of the enterprise based on 5G. to optimize production processes. As a result of the research, the concepts characterizing the reliability of distributed 5G information and communication networks were considered. The synthesis of functionally stable structure of the distributed information and communication network of 5G of the enterprise was formalized. The method of planning of 5G network for automation of production processes of the enterprise was developed. on the way of distribution taking into account restrictions on the minimum throughput, number of connections and reliability and construction of a communication transport segment with definition of an optimum location of cross premises. **Conclusions.** The developed method allows planning the optimal structure of the 5G cellular network to optimize production processes, evaluate and reduce the total cost of building the network, while providing the necessary indicators of service quality of network nodes and its reliability.

Keywords: reliability; information and communication system; 5G.

Метод обеспечения надежности подключения узлов к информационно-коммуникационной системе предприятия на базе 5G

Т. В. Смирнова

Аннотация. Объектом исследования является процесс построения облачной информационно-коммуникационной системы автоматизации производственных процессов. Предметом исследования является способ обеспечения надежности подключения узлов к информационно-коммуникационной системе компании на базе 5G. Целью данной работы является повышение надежности подключения узлов к информационно-коммуникационной системе предприятия на базе 5G. для оптимизации производственных действий. В результате исследования были рассмотрены понятия, характеризующие надежность распределенных информационно-коммуникационных сетей 5G. Также был разработан метод планирования сети 5G для автоматизации производственных процессов предприятия, заключающийся в последовательном обеспечении проектирования покрытия радиосети с определения местоположения каждой базовой станции с использованием оптимизированной модели оценки потерь мощности радиосигнала. на пути распространения с учетом ограничений по минимальной пропускной способности, количеству подключений и надежности и построению коммуникационного транспортного сегмента с определением оптимального месторасположения кроссовых помещений. **Выводы.** Разработанный метод позволяет планировать оптимальную структуру сотовой сети 5G для оптимизации производственных процессов, оценивать и уменьшать совокупные затраты на построение сети, при этом обеспечивая необходимые показатели качества обслуживания узлов сети и ее надежности.

Ключевые слова: надежность; информационно-коммуникационная система; 5G.