

ISSN 2618-0332 (print)
ISSN 2618-0340 (online)

Міністерство освіти і науки України

Херсонський національний технічний університет

ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Т. 5, № 1

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 3 від 20 грудня 2022 року)

Журнал включений до Реєстру наукових фахових видань України категорії Б
На підставі Наказу МОН України від 17 березня 2020 року № 409

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:
Google Scholar, Index Copernicus International World of Journals, CiteFactor Academic Scientific
Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky)



Видавничий дім
«Гельветика»
2022

Редакційна рада

Головний редактор

Астіоненко І.О.

к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики і математичного моделювання Херсонського національного технічного університету

Заступники головного редактора

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. П. Могили (м. Миколаїв)

Литвиненко О.І.

к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та фізико-математичних дисциплін Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова

Відповідальний секретар

Омельчук А.А.

к.т.н., доцент кафедри інтелектуальних управляючих та обчислювальних систем Університету державної фіскальної служби України (м. Ірпінь)

Члени редакційної колегії за спеціальностями:

Іноземні фахівці

Бабічев С.О.

к.т.н., доцент. (Чехія)

Гучек П.Й.

д.т.н., доцент, (Польща)

113 – Прикладна математика

Астіоненко І.О.

к.ф.-м.н., доцент

Гвоздева І.М.

д.т.н., професор

Гнатушенко Вікт.В.

д.т.н., доцент

Ляшенко В.П.

д.т.н., професор

Миргород В.Ф.

д.т.н., доцент

Різник В.В.

д.т.н., професор

Стрельнікова О.О.

д.т.н., професор

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., професор

112 – Комп'ютерні науки

Борисенко В.Д.	д.т.н., професор
Ванін В.В.	д.т.н., професор
Вірченко Г.А.	д.т.н., професор
Гнатушенко В.В.	д.т.н., професор
Гумен О.М.	д.т.н., професор
Корчинський В.М.	д.т.н., професор
Литвиненко В.І.	д.т.н., професор
Мартин Є.В.	д.т.н., професор
Несвідомін В.М.	д.т.н., професор
Пилипака С.Ф.	д.т.н., професор
Устенко С.А.	д.т.н., професор
Шоман О.В.	д.т.н., професор

126 – Інформаційні системи та технології

Аль-Амморі А.Н.	д.т.н., професор
Баклан І.В.	к.т.н., доцент
Бень А.П.	к.т.н., доцент
Левикін В.М.	д.т.н., професор
Литвиненко О.І.	к.т.н., доцент
Мороз Б.І.	д.т.н., професор
Стеценко І.В.	д.т.н., професор
Шерстюк В.Г.	д.т.н., професор

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Алексєєв М.О.	д.т.н., професор
Головко В.І.	д.т.н., професор
Кондратець В.О.	д.т.н., професор
Мещеряков Л.І.	д.т.н., професор
Омельчук А.А.	к.т.н.
Осадчий С.І.	д.т.н., професор
Рудакова Г.В.	д.т.н., професор

Інші спеціальності

Дудченко О.М.	к.ф.-м.н., доцент
Кузьмич В.І.	к.ф.-м.н., доцент
Літвінова М.Б.	д.пед.н., к.ф.-м.н., професор
Мельник І.В.	д.т.н., професор

ISSN 2618-0332 (print)
ISSN 2618-0340 (online)

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kherson National Technical University

APPLIED QUESTIONS OF MATHEMATICAL MODELLING

V. 5, №1

Recommended for publication by the Academic Council of
Kherson National Technical University
(Minutes No 3 on 20th December 2022)

The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:
Google Scholar, Index Copernicus International World of Journals, CiteFactor Academic Scientific
Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky).



Publishing House
"Helvetica"
2022

Editorial Board

Editor-in-Chief

Astionenko I.O.

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Mathematical Modelling of Kherson National Technical University

Deputies Editor-in-Chief

Khomchenko A.N.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Professor at the Department of Intelligent Information Systems of the Petro Mohyla Black Sea National University.

Lytvynenko O.I.

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Physical and Mathematical Disciplines of the Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Executive Secretary

Omelchuk A.A.

Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Technical Cybernetics of Kherson National Technical University.

Members of Editorial Board by Specialties:

Foreign Specialists

Babichev S.O.

Ph.D., Associate Professor, (Czech Republic)

Huchek P.Y.

Doctor of Engineering Science,
Associate Professor (Republic of Poland)

113 – Applied Mathematics

Astionenko I.O.

Ph.D., Associate Professor

Hvozdeva I.O.

Doctor of Engineering Science, Professor

Hnatushenko Vikt.V.

Doctor of Engineering Science, Associate Professor

Liashenko V.P.

Doctor of Engineering Science, Professor

Myrhorod V.F.

Doctor of Engineering Science, Associate Professor

Riznyk V.V.

Doctor of Engineering Science, Professor

Strelnikova O.O.

Doctor of Engineering Science, Professor

Khomchenko A.N.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor

122 – Computer Science

Borysenko V.D.	Doctor of Engineering Science, Professor
Vanin V.V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Virchenko H.A.	Doctor of Engineering Science, Professor
Hnatushenko V.V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Humen O.M.	Doctor of Engineering Science, Professor
Korchynskyi V.M.	Doctor of Engineering Science, Professor
Lytvynenko V.I.	Doctor of Engineering Science, Professor
Martyn Ye.V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Nesvidomin V.M.	Doctor of Engineering Science, Professor
Pylypaka S.F.	Doctor of Engineering Science, Professor
Ustenko S.A.	Doctor of Engineering Science, Professor
Shoman O.V.	Doctor of Engineering Science, Professor

126 – Information Systems and Technologies

Al-Ammori A.N.	Doctor of Engineering Science, Professor
Baklan I.V.	Ph.D., Associate Professor
Ben A.P.	Ph.D., Associate Professor
Levykin V.M.	Doctor of Engineering Science, Professor
Lytvynenko O.I.	Ph.D., Associate Professor
Moroz B.I.	Doctor of Engineering Science, Professor
Stetsenko I.V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Sherstiuk V.H.	Doctor of Engineering Science, Professor

151 – Automation and Computer Integrated Technologies

Aleksieiev M.O.	Doctor of Engineering Science, Professor
Holovko V.I.	Doctor of Engineering Science, Professor
Kondratets V.O.	Doctor of Engineering Science, Professor
Meshcheriakov L.I.	Doctor of Engineering Science, Professor
Omelchuk A.A.	Ph.D.
Osadchyi S.I.	Doctor of Engineering Science, Professor
Rudakova H.V.	Doctor of Engineering Science, Professor

Other Specialties

Dudchenko O.N.	Ph.D., Professor
Kuz'mich V.I.	Ph.D., Associate Professor
Litvinova M.B.	Doctor of Pedagogical Sciences, Ph.D. (physpcs and mathematics), Professor
Melnyk I.V.	Doctor of Engineering Science, Professor

ЗМІСТ

V.I. HOROBETS, V.I. DUBROVIN, J.V. TVERDOHLIV. DETECTION OF UNAUTHORISED ACTIONS AND ATTACKS IN NETWORKS OF THE METHOD OF WAVELET ANALYSIS.....	9
O.M. GUMEN, I.B. SELINA. A THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE THERMAL FIELD DURING WELDING THERMAL CYCLE.....	21
Т.С. КАГАДІЙ, А.Г. ШПОРТА, О.В. БІЛОВА, І.В. ЩЕРБИНА. ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ПРИ МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ.....	27
Є.Р. КОВИЛІН. АДЕКВАТНІСТЬ ПРОЦЕСУ ПОБУДОВИ СЕМАНТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОКУМЕНТУ НА ОСНОВІ НЕСТРУКТУРОВАНОЇ БАЗИ ЗНАНЬ.....	34
М.Б. ЛІТВИНОВА, О.Д. ШТАНЬКО. МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЦЕНТРУ EL2 В АРСЕНІДІ ГАЛІЮ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ДИФУЗІЇ ДОМІШОК.....	42
О.С. МАЗМАНШВІЛІ, М.Г. РЕШЕТНЯК. ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ, ЩО ЕМИТОВАНІ КАТОДАМИ НЕЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ.....	49
Д.А. НАГОВСЬКИЙ, Г.Г. ДОЩЕНКО. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПОСТЕРІГАЧА ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ УТРИМАННЯМ ПОЛОЖЕННЯ СУДНА.....	58
О.М. ПАВЛЕНКО, Е.Г. МУРТАЗІСЬ, В.М. ВЕРЕЩАГА. ТОЧКОВІ ПОЛІНОМИ ЯК КОМПОЗИЦІЙНІ ГЕОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ.....	64
М.Р. ПЕТРИК, І.Я. МУДРИК, М.В. БАЧИНСЬКИЙ, І.Я. СТАДНИК, М.І. ПІДГУРСЬКИЙ, В.О. ЯМКО. ВИСОКОПРОДУКТИВНІ МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АНОРМАЛЬНИХ РУХІВ ПІД ДІЄЮ ЗВОРОТНИХ КОГНІТИВНИХ ВПЛИВІВ.....	72
G.M. SMAKOVSKA. OPTIMAL TECHNOLOGIES OF AWNING STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS CHARACTERISTICS OF THE PARAMETERS.....	82
Н.О. СОКОЛОВА, В.В.ГНАТУШЕНКО, М.С. МІЩЕНКО, О.А. АТАМАНЧУК. МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ НЕІГРОВИХ ПЕРСОНАЖІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....	87
М.О. ТЕРЕЩУК. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНІ ГЕОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ ПОВЕРХОНЬ КУПОЛІВ ПРАВОСЛАВНИХ ХРАМІВ.....	95
Л.С. ФОНАР, О.С. КОНОВАЛОВ, Є.Г. ФІЛІППОВ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГРОЗ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВЕБ-ТЕХНОЛОГІЙ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ.....	101
А.К. ЯЦЕНКО, В.І. ДУБРОВІН, Л.Ю. ДЕЙНЕГА. АНАЛІЗ ТРАФІКУ ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕНТРОПІЇ.....	108

CONTENTS

V.I. HOROBETS, V.I. DUBROVIN, J.V. TVERDOHLIB. DETECTION OF UNAUTHORIZED ACTIONS AND ATTACKS IN NETWORKS OF THE METHOD OF WAVELET ANALYSIS..... 9

O.M. GUMEN, I.B. SELINA. A THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE THERMAL FIELD DURING WELDING THERMAL CYCLE..... 21

T.S. KAGADIY, A.H. SHPORTA, O. BILOVA, I. SCHERBINA. CONSIDERATION OF NONLINEAR PROPERTIES OF MATERIALS IN MATHEMATICAL MODELING..... 27

Y.R. KOVULIN. ADEQUACY OF THE PROCESS OF BUILDING THE SEMANTIC MODEL OF THE DOCUMENT BASED ON AN UNSTRUCTURED KNOWLEDGE BASE..... 34

M. B. LITVINOVA, O. D. SHTANKO. SIMULATION OF THE EL2 CENTER PHYSICAL PROPERTIES IN GALLIUM ARSENIDE ACCORDING TO THE RESULTS OF THE IMPURITIES HIGH-TEMPERATURE DIFFUSION 42

O.S. MAZMANISHVILI, M.G. RESHETNYAK. FORMATION OF IMAGES BY ELECTRONIC BEAMS, WHAT IS EMITTED BY NON-CYLINDRICAL CATHODES IN THE MAGNETIC FIELD OF THE MAGNETRON GUN 49

D.A. NAHOVSKYI, H.G. DOSHCENKO. MATHEMATICAL MODEL OF THE OBSERVER FOR THE VESSEL POSITION MAINTENANCE CONTROL SYSTEM..... 58

O.M. PAVLENKO, E.G. MURTAZHIEV, V.M. VERESHCHAKHA. POINT POLYNOMS AS COMPOSITE GEOMETRIC MODELS..... 64

M. PETRYK, I. MUDRYK, M. BACHYNSKYI, I. STADNYK, M. PIDGURSKYI, V. YAMKO. HIGH-PRODUCT METHODS AND INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MODELING AND IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF ABNORMAL MOVEMENTS UNDER THE INFLUENCE OF REFUSED COGNITIVE INFLUENCES 72

G.M. SMAKOVSKA. OPTIMAL TECHNOLOGIES OF AWNING STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS CHARACTERISTICS OF THE PARAMETERS 82

N.O.SOKOLOVA, V.V. HNATUSHENKO, M.S. MISHCHENKO, O.A. ATAMANCHUK. MODELING THE BEHAVIOR OF NON-PLAY CHARACTERS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE..... 87

M.O. TERESCHUK. STRUCTURAL-PARAMETRIC GEOMETRIC MODELS OF DOMES SURFACES OF ORTHODOX TEMPLES..... 95

L.S. FONAR, O.S. KONOVALOV, E.G. FILIPPOV. STUDY OF INFORMATION SECURITY THREATS AT USED WEB TECHNOLOGIES OF DISTANCE EDUCATION..... 101

A.K. YATSENKO, V.I. DUBROVIN, L.Y. DEYNEGA. ANALYSIS OF SOFTWARE-DEFINED NETWORK TRAFFIC USING ENTROPY..... 108

V.I. HOROBETS, V.I. DUBROVIN
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
J.V. TVERDOHLIB
Freshcode Zaporizhzhya

DETECTION OF UNAUTHORISED ACTIONS AND ATTACKS IN NETWORKS OF THE METHOD OF WAVELET ANALYSIS

Behavioural methods based on the models of "normal" functioning of an information network. The principle of work is in identifying differences between the current state of the information system functioning and the one that is thought to be exemplary for this network. Any discrepancy is seen as an intrusion or anomaly.

Perspective method for detecting unauthorised invasions must have high accuracy of detection known and unknown types of cyberattacks, perfectly own accuracy of decision-making, that is low number of false positives.

The detecting cyberattacks method based on wavelet analysis (WA) proved itself well in struggling against non stationary signals. The wavelet transform (WT) has a self-adjusting moving frequency-time window, but equally well reveals both low-frequency (LF) and high-frequency (HF) characteristics of the signal on different time scales. Wavelet filters allow not only to fight against noise, but also to extract the necessary components of the signal.

Today's society cannot do without information technology. IT plays a major role in and is an integral part of every sphere of our life. Current development of the information society is inextricably linked with collecting, processing and passing huge amounts of data, and converting data into a product that has significant value. This is the main reason behind the global shift from the industrial society to the information society. The invention of the Internet has led to a significant increase in international communication in various spheres of human life.

On the other hand, along with a large number of benefits, there has been a significant number of threats related to the current technology. There are currently multiple threats now on both national and international level. Therefore, different mechanisms for protecting cyberspace are now part of many countries' national strategy

Network anomalies are so varied that they cannot be categorized using one simple classification. The number of attacks, their power and complexity are increasing. Malicious users are looking for radically new ways of network intrusion and the existing methods of cyber protection often turn out to be inefficient. [1].

Keywords: wavelet basis, wavelet analysis, wavelet filter, de-noise suppression, network traffic, sinusoid, network anomaly.

V.I. ГОРОБЕЦЬ, В.І. ДУБРОВІН
Національний університет «Запорізька Політехніка»
Ю.В. ТВЕРДОХЛІБ
Навчальний центр Freshcode м. Запоріжжя

ВИЯВЛЕННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНИХ ДІЙ ТА АТАК В МЕРЕЖАХ МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

Поведінкові методи засновані на моделях «нормального» функціонування інформаційної мережі. Принцип роботи полягає у виявленні відмінностей між поточним станом функціонування інформаційної системи та тим, який вважається зразковим для цієї мережі. Будь-яка невідповідність розглядається як вторгнення або аномалія

Перспективний метод виявлення несанкціонованих вторгнень повинен мати високу точність виявлення відомих та невідомих типів кібератак, володіти бездоганною достовірністю прийняття рішень, тобто низьким числом хибних спрацьовувань.

Метод виявлення мережевих атак на основі вейвлет-аналізу (ВА) добре зарекомендував себе в боротьбі з нестационарними сигналами. Вейвлет-перетворення (ВП) володіє самоналагоджувальним рухомим частотно-часовим вікном, однаково добре виявляє як низькочастотні (НЧ), так і високочастотні (ВЧ) характеристики сигналу на різних часових масштабах. Вейвлет-фільтри дозволяють не тільки боротися з шумами, але і витягувати необхідні компоненти сигналу.

Сьогодні сучасне суспільство вже не може обійтися без інформаційних технологій. Вони виконують головну роль та є невід'ємною частиною всіх сфер життя людини. Нинішній розвиток інформаційного суспільства нерозривно пов'язаний з необхідністю збору, обробки і передачі величезних об'ємів інформації, перетворенням інформації у товар, який має значну вартість. Це головна причина глобального переходу від індустріального суспільства до інформаційного. Поява всесвітньої мережі Інтернет спричинила масштабне зростання міжнародних спілкувань у різних сферах людського життя.

З іншого боку, поряд із великою кількістю переваг з'явилася значна кількість загроз, пов'язаних із функціонуванням сучасних технологій. Дане явище призвело до появи значної кількості небезпек, які вражають суспільство як на національному рівні, так і міжнародному. Отже, з'явилася потреба в механізмах захисту

кіберпростору, які описуються в національних стратегіях світових держав, що в свою чергу присвячені забезпеченню його захисту.

Відомі мережеві аномалії настільки різноманітні, що їх не можна категоризувати за допомогою однієї простої класифікації. Швидко зростає кількість атак, їх потужність та складність. Зловмисники шукають принципово нові методи незаконних втручань у мережу і дуже часто існуючі засоби захисту виявляються безсилими перед ними [1].

Ключові слова: вейвлет-базис, вейвлет-аналіз, вейвлет-фільтр, шумоподавлення, мережевий трафік, синусоїда, мережева аномалія.

Problem formulation

This article offers an approach for analysis of digital production security based on evaluation of a posteriori probability for change point in time-series, which are based on the change point coefficient values of digital wavelet-transform in the network traffic time-series. These time-series make it possible to consider the network traffic from several points of view at the same time, which plays an important role in the task of detecting network attacks. The attack methods vary significantly; therefore, in order to detect them it is necessary to monitor different values of various traffic parameters. The proposed method has demonstrated its efficiency in detecting network service denial attacks being realized at the application level..

Types of network attacks

Detecting network attacks is crucial because they can result in data breach or data tampering. Normally, one of the signs of a network attack is the appearance of a network anomaly. Network anomalies might be caused by different reasons including malicious users, incompetent users, hardware and software defects. There are visible anomalies that can be seen in information systems malfunctioning, and anomalies which have no visible signs but can lead to a system failure in the long run. Network anomalies can be divided into two groups: software and hardware anomalies and security issues (figure 1) [2].

Normal work of network devices and PC users can be described by a certain system of behaviour. The work users perform is normally defined by their working responsibilities, which implies using the same network resources, certain activity of the network devices, the direction of the inbound/outbound traffic on the ports of the network switches, routers, servers, and firewalls. As a rule, users use the same information resources in the local network: corporate portals, email and files servers.

Network attacks can be divided into active and passive ones. Active attacks have a visible influence on the system resulting in changing its state. Examples include malware that is inserted in a program, tampering with the data on a webpage, blocking a network service by bombarding it with requests. The defining feature of active attacks is that they leave traces.

Memory storage is changed, there are strange diagnostic messages, apps start working incorrectly, they might freeze or crash altogether, there are weird surges in activity in the network traffic properties and other static data about the system's performance. However, a carefully planned active attack can go unnoticed if the specialists who are in charge of network protection have no thorough understanding of the consequences of such attacks.

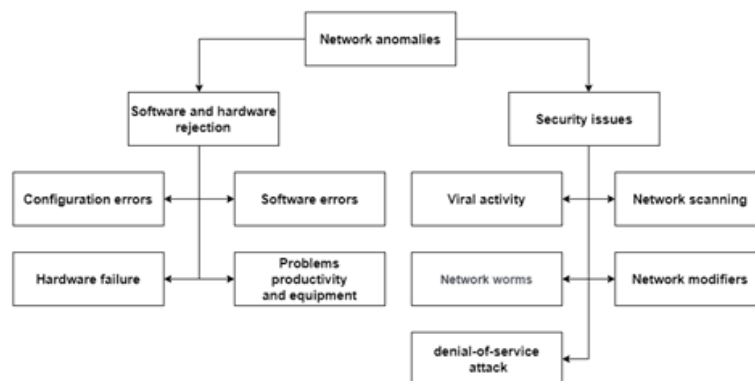


Fig. 1. Basic types of network anomalies [2]

Passive attacks do not disrupt normal functioning of the system—they have to do with collecting information about the system and eavesdropping on the intranet traffic. In many cases, passive attacks leave no traces, so they are hard to detect and they often go unnoticed [3].

DoS-attack and DDoS-attack

Active attacks include two highly common attacks: a denial-of-service attack (DoS-attack) and a distributed denial-of-service attack (DDoS attack).

In a DoS-attack, the system that was designed to process the requests of legal users suddenly stops doing this or does so with significant delays, which is equivalent to denial of service. A denial of service can occur as a result of malicious actions when overload is created deliberately: a barrage of requests is sent to a computer being attacked by the attacking computer. This barrage of requests «floods» the computer under attack causing an overload and, eventually, making it inaccessible. Blocking happens as a result of exhausting the resources of the CPU, operating system or bandwidth.

The malicious user can dramatically increase the negative effect of conducting a DoS-attack by stealing the computing power for their own use. In order to do this, the malicious user gains control of the computer, installs special malware into it and activates it. In this way, the malicious user takes hold of part of the computing power of the computer under attack without the computer’s owner being aware of it.



Fig. 2. An example of a DDoS attack [4]

In this case, the owner of the computer under attack suffers no other losses apart from a fall in computer’s performance. For a more powerful attack, the malicious user gains control of several computers, synchronises their work and directs a common barrage of requests from these computers to the computer they want to target. An attack of this kind is called a distributed denial-of-service attack (DDoS attack).

Spoofing

When carrying out network attacks, it is important for the malicious user not only to achieve their goal, which is doing harm to the object being targeted, but also to cover their tracks. One of the main ways of doing this is replacing the content of packages, or spoofing. In particular, in order to hide the location of the source of malicious packets, the malicious user changes the value of the sender’s address field in the packages’ headers. Since the sender’s address is generated automatically by the system’s software, the malicious user makes changes to the respective software modules in a way to be able to send packages with any IP-addresses from their computer [5].

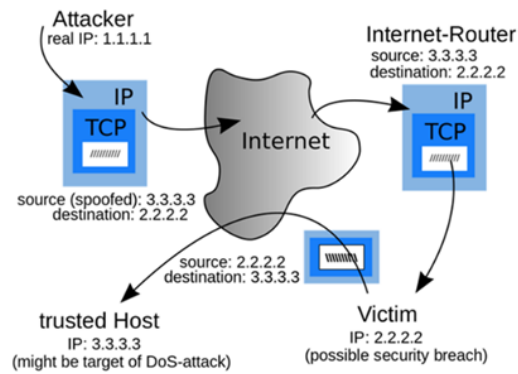


Fig. 3. An example of spoofing [4]

Algorithms and ways of detecting network anomalies

When researching normal behaviour, a profile that describes a network's normal performance needs to be created. This statistics can be received from network devices such as network switches, firewalls, and proxy servers with the help of active monitoring. Then this data needs to be analyzed and stored in a database. Any deviation from the rules of the profile that has been created needs to be subjected to the analysis of the network anomalies detection system. The analysis shows that there are numerous algorithms for detecting network anomalies. These algorithms are described below.

Algorithm based on discrete WT (wavelet transform) with the use of statistical criteria. In this algorithm, a sliding window method is used (W1 and W2), which lets one increase the chance of detecting insignificant anomalies. The main advantage of this algorithm is that an attack is well detected on any level of CWT decomposition (an F-factor detects an attack most notably).

The Brodsky-Darkhovskiy algorithm of detecting anomalies. When selecting a standard mode, it is the noises that detect the special influence. When selecting the algorithm in the sliding window mode, the total number of obstacles decreases, and the surges that signal the beginning and end of the influence are more notable. For practical usage, it is better to use the algorithm in the sliding window mode.

The algorithm based on the sum of squared wavelet coefficients. The biggest effect is detected when using the Haar coefficients of approximation for wavelets on the higher levels of decomposition. Increasing the size of the analysis window can lead to the increase of the correct detection of an anomaly, but the likelihood of erroneous detection increases as well.

The algorithm based on the maximum of squared wavelet coefficients. This algorithm is less efficient than the one based on the sum of squared wavelet coefficients. The most informative display of an attack in this algorithm can be achieved by approximation coefficients with the use of the Haar wavelet.

Another way of detecting attacks is using a firewall. A firewall is a combination of software and hardware that isolates the internal network from the Internet. It allows certain packets to pass while blocking others. A firewall lets the network administrator control access to the corporate networks, which happens externally as well as control the resources of the admin network by regulating the incoming and outgoing traffic.

All firewalls fall into three categories::

- traditional packet filtering firewalls;
- circuit-level gateways;
- application-level gateways.

In packet filtering firewalls all the incoming and outgoing traffic of the internal corporate network passes through a router in which packets are filtered. A packet filtering firewall checks every datagram and determines what needs to be done with it based on the rules defined by the network administrator. The network administrator configures the firewall based on the organisation policy.

Circuit-level gateways monitor the TCP connection and do the filtering based on this information. All the current TCP connections are monitored in a special connections table. If the incoming packet does not belong to the current connection, it will be declined by the firewall.

Application-level gateways that are aimed at providing more localized security combine the features of packet filtering firewalls and application-level gateways. An application-level gateway is a server that works on the application level and through which all the application data, both incoming and outgoing, passes. Several application-level gateways can work on one hosting, but each each gateway is a separate server with its own set of processes [4].

Intrusion detection systems

Intrusion detection systems let one detect various attacks, including tracerouting, port scanning, TCP scanning, DoS-attacks, worms and viruses as well as attacks on the operating system's or certain applications' vulnerabilities.

An organization's network can have several such systems. When they work simultaneously, they work in sync, sending messages about suspicious network traffic to the CPU which collects and systematizes this data and informs the administrator if necessary. Intrusion detection systems can be signatures-based and anomaly-based.

Signature-based systems have large databases of the attacks' signatures. Each signature is a set of rules that describes ways of fighting the attacks. This system analyzes each packet that goes through it and compares it to the signatures from the database. If the packet matches the signature, a warning is generated. The downsides to this approach are that the system is helpless against unregistered attacks, the matches with the signatures can turn out to be not an attack and when comparing a packet with a large collection of signatures, the system may perform poorly under the strain and miss malicious packets.

An anomaly-based system creates a profile of reliable traffic that works in a normal mode. Then it detects streams of packets that have static peculiarities. For instance, a disproportionate increase in packets or an abrupt surge of intensity in port scanning. The main benefit of these systems is their ability to detect new attacks that have not been previously described, yet it is incredibly hard to differentiate between normal traffic and unusual one.

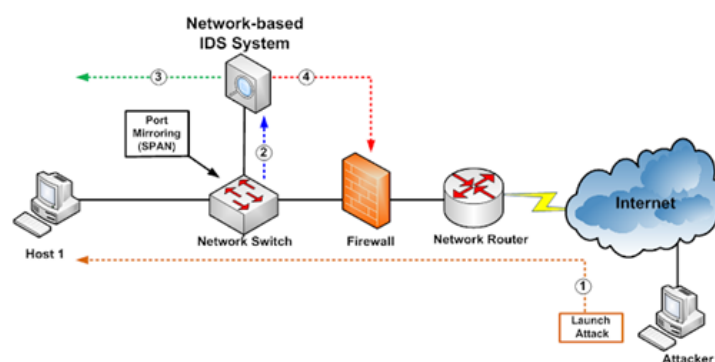


Fig. 4. An intrusion detection system [4]

Wavelet properties

A wavelet is a mathematical function that allows a signal to be divided into different frequency and time components. The term «wavelet» that stands for «a little wave» appeared relatively recently- it was introduced in mid 80s by Grossman and Morlet who were analyzing the properties of seismic and acoustic signals [6].

The graph of the function looks like a wave-like oscillation with an amplitude that decreases to zero far from the origin. However, in a general case the signals analysis is done in the frame of wavelet-coefficients (Scale-Time-Amplitude) [7].

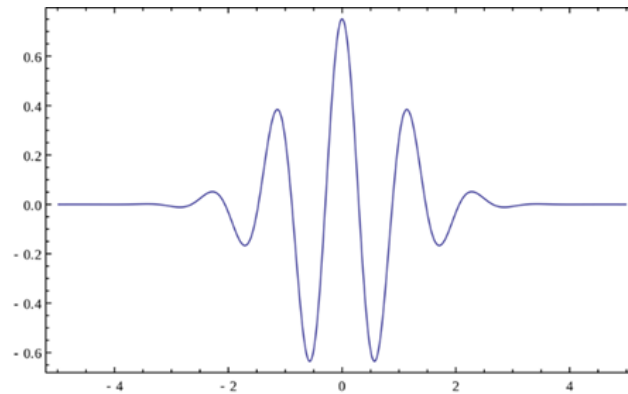


Fig. 5. Morlet wavelet [8]

WT is an integral transform that is a mix of a wavelet function with a signal. Wavelet transformation converts a signal from a temporal representation to a time-frequency one [9].

A method of converting a function (or signal) into a form that makes some of the output signal quantities more amenable to study, or allows the output data set to be compressed. WT is quite similar to the Fourier transform (or more like the windowed Fourier transform) but with a completely different evaluation function. The main difference is: the Fourier transform decomposes the signal into components in the form of sines and cosines, that are functions localised in Fourier space; however, WT uses functions localised in both real and Fourier space [10].

In numerical and functional analysis, DWTs refer to WTs in which wavelets are represented by discrete signals (samples).

The first DWT was invented by the Hungarian mathematician Alfred Haar. For an input signal represented by an array of 2^n numbers, the Haar WT simply groups the elements by 2 and forms sums and differences from them. Sums are grouped recursively to form the next level of decomposition. The result is $2^n - 1$ differences and 1 total.

This simple DWT shows the general useful characteristics of wavelets. First, the transformation can be performed in $n \log_2(n)$ operations. Secondly, it not only decomposes the signal into some semblance of frequency bands (by analysing it at different scales), but also represents the time domain, that is, the moments of occurrence of certain frequencies in the signal. Together, these properties characterise the fast WT – a possible alternative to the usual fast Fourier transform. When accepting the condition of randomness of the signal X , the spectral density of its amplitude Y is calculated based on the Yates algorithm: $\text{matrix } Y = \text{matrix}(\pm X)$, the reverse is also true $\text{matrix } X = \text{matrix}(\pm Y)$.

FWT is an implementation of WT using arbitrary scales and practically arbitrary wavelets. The wavelets used are not orthogonal and the data obtained during this transformation are highly correlated. For discrete time sequences, this transformation can also be used, with the restriction that the smallest wavelet transfers must be equal to the data discretisation. It is sometimes called discrete-time GDP (DT-CWT) and is the most commonly used method for calculating CWT in real-world applications. We calculate the convolution of the signal with a scaled wavelet. For each scale, we obtain in this way a set of the same length N as the input signal. By using M arbitrarily chosen scales, we are getting an $N \times M$ field that directly represents the time-frequency plane. The algorithm used for this calculation can be based on direct convolution or on convolution using multiplication in Fourier space (this is sometimes can be called Fast wavelet transform).

The choice of wavelet to use in time-frequency decomposition is the most important thing to do. By doing this choice, we can influence the resolution of the result by time and frequency. This does not change the basic characteristics of the WT (low frequencies have good frequency resolution and poor time resolution; high frequencies have poor frequency resolution and good time resolution), but you can slightly increase the overall frequency or time resolution. This is directly proportional to the width of the wavelet used in real and Fourier space. For example, if a Morlet wavelet is used (the real part is a decaying cosine function), then one can expect a high frequency resolution, since

such a wavelet is very well localised in frequency. However, using the Derivative of Gaussian (DOG) wavelet, we will get good localisation in time, but poor in frequency.

FWT is commonly used for signal analysis. That is why it is widely used in scientific research of physical processes.

Advantages of WT

By conducting an analysis of the WT theory and comparing them with the main "opponent" – the Fourier transform, it was concluded that, despite the great role of the Fourier transform, the WT provides certain advantages in the analysis and processing of signals, which are:

- WTs have almost all the advantages of Fourier transforms;
- wavelet bases can be well localised both in terms of frequency and time;
- unlike to Fourier transforms, wavelet bases have quite a lot of various basic functions, the properties of which are oriented towards the solution of various tasks.

The disadvantage of WT is their relative complexity.

It is possible to conclude about the expediency of using WT to analyse and process signals for further detection of possible unauthorised actions or attacks in the network [11].

Processing of informational signals using WT

The number of different wavelet functions is very large, but not all of them may be suitable for the analysis of the input signal of the network.

Given that the signal, which has undergone analog-digital conversion, is presented in the form of statistical data – for effective processing of discrete signal segments, the WT must be discrete.

For successful decomposition into approximating (approximating) cA_j and detailing cD_j coefficients, the wavelet family must possess a scaling function that determines a rough approximation of the signal and generates approximation coefficients, as well as a wavelet function $\psi(t)$ that determines signal details and generates detailing coefficients [12].

From the orthogonal wavelets presented in the PyWavelets package, you can select a group of orthogonal wavelets with a compact carrier (of finite length):

- Dobsesha wavelet – «db»;
- Simlet wavelet – «sym»;
- Coiflet wavelet – «coif»;
- Haar wavelet – «haar».

These types of wavelets have the following main parameters:

- the scaling function $\psi(t)$ exists;
- functions $\psi(t)$ and $\phi(t)$ have a compact support;
- the function $\psi(t)$ has several zero moments.

These four wavelet functions were used to analyse and process the input traffic signal. The results of the first-level decomposition of the input signal by different wavelets can be seen in the pictures 6-10.

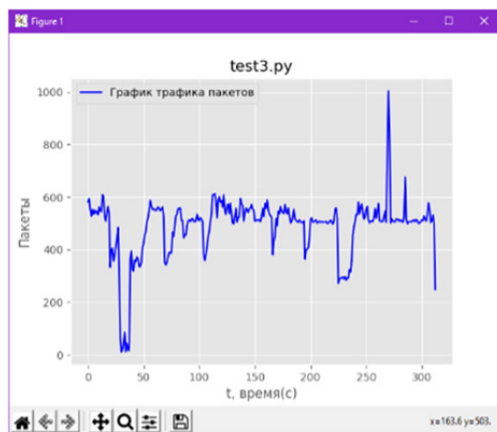


Fig. 6. The input signal from the data format *.csv

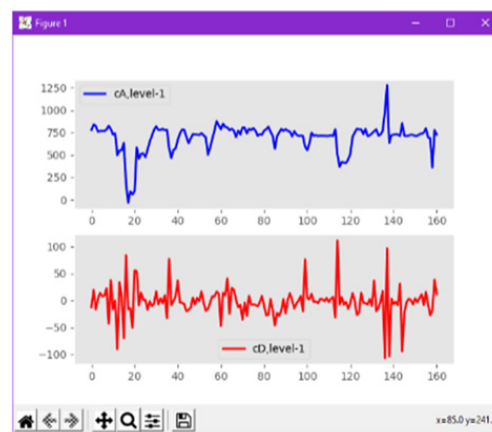


Fig. 7. The first level of signal decomposition into HF and LF using the Simlet-5 wavelet



Fig. 8. The first level of signal decomposition in HF and LF using Coiflet-5 wavelet



Fig. 9. The first level of signal decomposition in HF and LF using Dobsesha-5 wavelet



Fig. 10. The first level of signal decomposition into HF and LF using Haar-5 wavelet

Based on this, it is possible to conclude about the expediency of using the wavelet function of the 5-order Dobsesha family for the analysis and processing of signals for further detection of possible unauthorised actions or attacks in the network.

Analysis of the input signal with a selected wavelet function

To analyse the input signal, it is necessary to make a multi-level decomposition of this signal and obtain HF and LF graphs. Then choose the most informative level of decomposition. The approximation coefficients (cA) are the output of the low-pass filter (averaging filter) of the DWT. The detail coefficients (cD) represent the output of the high-pass filter (difference filter) of the DWT. The results of the multi-level decomposition of the signal by the Dobsesha-5 wavelet function are shown in the pictures 11-15.

Based on the results of multi-level decomposition of the signal, it can be concluded that the higher the level of decomposition, the shorter the output signal of LF and HF. By approximating the input signal, you can see in which intervals the signal behaves abnormally.

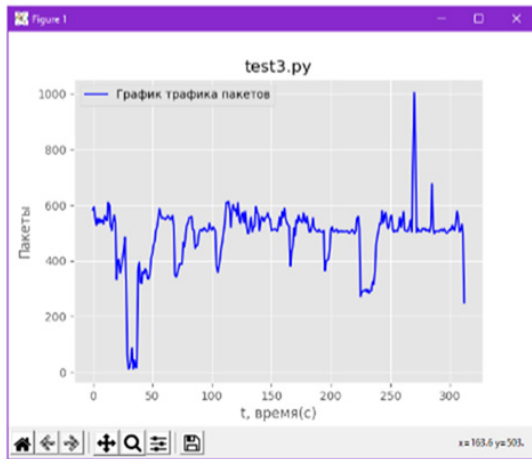


Fig. 11. The input signal from the data format *.csv

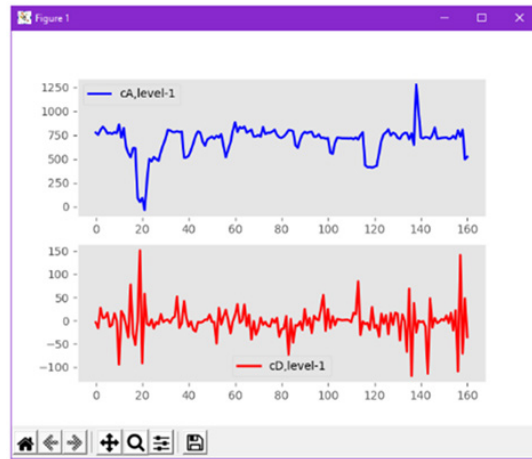


Fig. 12. The first level of signal decomposition in HF and LF using Dobesha-5 wavelet



Fig. 13. The second level of decomposition of the signal into HF and LF using the Dobesha-5 wavelet

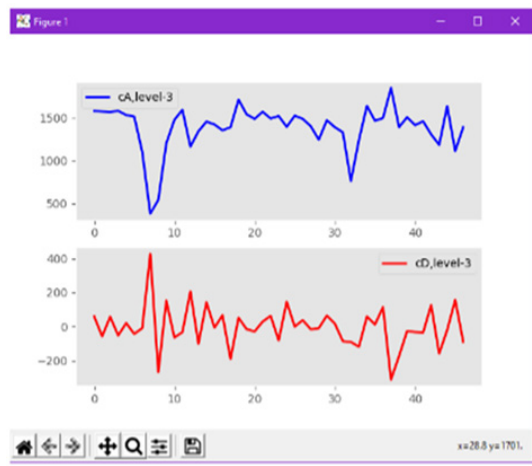


Fig. 14. The third level of signal decomposition into HF and LF using Dobesha-5 wavelet

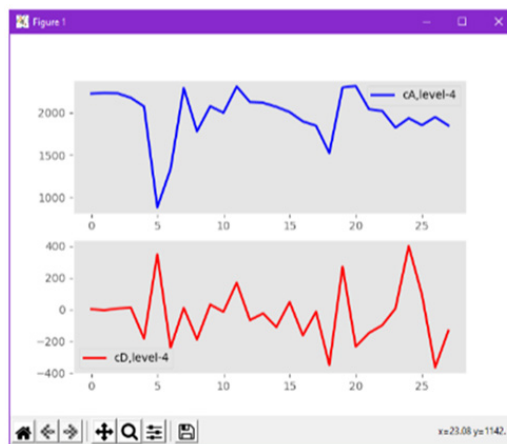


Fig. 15. The fourth level of signal decomposition in HF and LF using the Dobesha-5 wavelet

A practical example of anomaly detection using WA

WA is classified as a behavioural attack detection method. This is a method that is based on the use of information about the normal behaviour of the system and its comparison with the parameters of the observed behaviour [13].

In practice, the average values of the following values aggregated for five-minute intervals were used as output data: the number of bytes per second, the number of packages per second, the number of flows per second, and the average size of a TCP package. In each case, the collected data was a discrete sequence of the frequency-time signal, which, according to the proposed BA algorithm, was decomposed into a hierarchy of several layers. For each of the extracted signals, the time variable was independent [14].

The presence of sharp amplitudes in each of the signals presented corresponded to certain groups of anomalies:

- anomalies caused by errors in network equipment settings, as well as equipment failure (G1);
- network attacks represented by the denial-of-service class (G2);
- congestion in the network (flash crowd), which arise as a result of sudden surges, for example, at times of increase in legitimate requests for downloading new software (G3);
- other anomalies, which include the exchange of large amounts of data, errors when recording traffic on the sensor or sending data to the NetFlow collector, which allows for analysis of network traffic at the session level (G4).

Three components of the primary signal were identified [14]. The LF component of the signal captured long-term network anomalies, which lasted for several days. The mid-frequency part had zero mathematical expectation and was intended to analyze fluctuations within one day. The HF part corresponded to small short-term changes, which can be considered as noise.

After splitting the original signal [14], the procedure for calculating the local variance within a sliding window of 3 hours was applied to its first two components. Next, the threshold analysis method is used. Anomaly is identified if the peak point of the last signal exceeded the specified threshold.

As a result of the study, it was concluded that the presented types of anomalous events can be identified at specific, inherent frequencies. Thus, coarse-grained anomalies of the G1, G2, and G4 classes are recognized at high and medium frequencies, while low- and medium-frequency signals correspond to the G3 class anomalies [10].

The disadvantages of WA can be called – the ambiguity of the choice of basis functions, the high computational complexity when calculating the coefficients of the signal decomposition. The task of correctly assigning the size of the window is non-trivial. As noted, if the size of the sliding window is much larger than the duration of the anomaly, then the frequency spike corresponding to it can be smoothed out, and thus the attack will be missed. Otherwise, if the size of the window is too small, then a flow of meaningless anomalies is inevitable.

Conclusion

WTs have practically all the advantages of Fourier transforms. Wavelet bases can be well localised both in frequency and in time. When highlighting well-localised multi-scale processes in the signals, only those large-scale levels of decomposition that are of interest can be considered.

Wavelet bases, in contrast to the Fourier transform, have many different basic functions, the properties of which are aimed at solving various problems. Basic wavelets can be both finite and infinite carriers implemented by functions of different smoothness.

The disadvantage of WT is the ambiguity of the choice of basis functions, great computational complexity when calculating the signal decomposition coefficients. The task of correctly assigning the size of the window is non-trivial. As noted, if the size of the sliding window is much greater than the duration of the anomaly, then the frequency spike corresponding to it can be smoothed out, and thus the attack will be missed. Otherwise, if the size of the window is too small, then an inevitable flow of meaningless anomalies.

Список використаної літератури

1. Горобець В.І., Дубровін В. І., Твердохліб Ю.В. Поведінкові методи виявлення несанкціонованих дій та атак в мережах методом вейвлет-аналізу. *Комбінаторні конфігурації та їхні застосування*: Матеріали XXIII Міжнародного науково-практичного семінару імені А.Я. Петренюка, присвяченого 70-річчю Льотної академії Національного авіаційного університету (Запоріжжя–Кропивницький, 13-15 травня 2021 року) / за ред. Г.П. Донця – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2021. 208 с.
2. Tverdohleb J.V., Dubrovin V.I. Processing of ECG signals based on wavelet transformation. *International journal of advanced science and technology*, 2011. Vol. 30. p. 73 – 81.
3. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 5-е изд. СПб.: Питер, 2016. 992 с.: ил. (Серия «Учебник для вузов»).
4. Види мережевих атак. Способи їх виявлення. – URL: <http://holodoks.blogspot.com/2017/12/blog-post.html>. (дата звернення 01.12.2022).
5. Куроуз Джеймс, Кит Росс. Компьютерные сети : Нисходящий подход : 6-е изд. М.: Издательство «Э», 2016. 912 с.
6. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры. *Успехи физических наук*. М.: Наука, 1996. Том 166, №11. С. 1145-1170.
7. Смоленцев Н. К. Введение в теорию вейвлетов. Ижевск: РХД, 2010. 292 с.
8. Вейвлет. Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Вейвлет> (дата обращения 02.12.2022).
9. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 440 с.
10. Браницкий А. А., Котенко И. В. Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак. *Труды СПИИРАН*. 2016. № 45. С. 207-244.
11. Вейвлет – преобразование. URL: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/wavelet-transform.html> (дата обращения: 02.12.2022).
12. Критерии оценки качества алгоритмов обнаружения сетевых аномалий. URL: <http://research-journal.org/technical/kriterii-ocenki-kachestva-algoritmov-obnaruzheniya-setevykh-anomalij.html> (дата обращения: 03.12.2022).
13. Debar H., Dacier M., Wespi A. Towards a taxonomy of intrusion-detection systems. *Computer Networks*. 1999. Vol. 31. Issue 8. pp. 805–822.
14. Barford P., Kline J., Plonka D., Ron A. A signal analysis of network traffic anomalies. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet measurement*. 2002. pp. 71–82.

References

1. Horobets, V.I., Dubrovin, V. I., & Tverdokhlib, Yu.V. (2021). Povedinkovi metody vyivlennia nesanktsionovanykh dii ta atak v merezhakh metodom veivlet-analizu. *Kombinatorni konfhuratsii ta yikhni zastosuvannia*: Materialy XXIII Mizhnarodnoho naukovo-praktychnoho seminaru imeni A.Ia. Petreniuka, prysviachenoho 70-richchiu Lotnoi akademii Natsionalnoho aviatsiinoho universytetu (Zaporizhzhia–Kropyvnytskyi, 13-15 travnia 2021 roku) / za red. H.P. Dontsia – Kropyvnytskyi: PP «Ekskliuzyv-System».
2. Tverdohleb, J.V., & Dubrovin, V.I. (2011). Processing of ECG signals based on wavelet transformation. *International journal of advanced science and technology*, **30**, 73 – 81.
3. Olifer, V. G., & Olifer, N. A. (2016). Kompyuternye seti. Printsipyi, tehnologii, protokolyi: Uchebnik dlya vuzov. 5-e izd. SPb.: Piter.
4. Vidy merezhevykh atak. Sposoby yikh vyivlennia. – URL: <http://holodoks.blogspot.com/2017/12/blog-post.html>. (data zvernennia 01.12.2022).
5. Kurouz, Dzheyms, & Kit, Ross. (2016). Kompyuternye seti : Nishodyaschiy podhod : 6-e izd. M.: Izdatelstvo «E».

6. Astafeva, N. M. (1996). Veyvlet-analiz: osnovyi teorii i primeryi. Uspehi fizicheskikh nauk. M.: Nauka, **166** (11), 1145-1170.
7. Smolentsev, N. K. (2010). Vvedenie v teoriyu veyvletov. Izhevsk: RHD.
8. Veyvlet. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Veyvlet> (data obrascheniya 02.12.2022).
9. Dyakonov, V. P. (2004). Veyvletyi. Ot teorii k praktike. M.: SOLON-Press.
10. Branitskiy, A. A., & Kotenko, I. V. (2016). Analiz i klassifikatsiya metodov obnaruzheniya setevyih atak. *Trudy SPIIRAN*. **45**, 207-244.
11. Veyvlet – preobrazovanie. URL: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/wavelet-transform.html> (data obrascheniya: 02.12.2022).
12. Kriterii otsenki kachestva algoritmov obnaruzheniya setevyih anomalij. URL: <http://research-journal.org/technical/kriterii-ocenki-kachestva-algoritmov-obnaruzheniya-setevyx-anomalij.html> (data obrascheniya: 03.12.2022).
13. Debar, H., Dacier, & M., Wespi, A. (1999). Towards a taxonomy of intrusion-detection systems. *Computer Networks*. **31** (8), 805–822.
14. Barford, P., Kline, J., Plonka, & D., Ron, A. (2002). A signal analysis of network traffic anomalies. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet measurement*, 71–82.

Горобець Владислав Ігорович – студент Національного університету «Запорізька політехніка», факультет комп'ютерних наук і технологій, програмна інженерія. e-mail: vladoshorobets@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2905-9420.

Дубровін Валерій Іванович – к.т.н., професор кафедри програмної інженерії Національного університету «Запорізька політехніка». e-mail: vdubrovin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0848-8202.

Твердохліб Юлія Володимирівна – к.т.н. з інформатики, лектор веб fullstack розробки в навчальному центрі Freshcode (м. Запоріжжя), e-mail: julia.tverdohleb@gmail.com

A THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE THERMAL FIELD DURING WELDING THERMAL CYCLE

In this paper finite element modeling of welding thermal cycle is studied. The finite element method (FEM) is the dominant discretization technique in structural mechanics. FEM simulations are nowadays useful to predict such things as the weld pool shape for various combinations of process parameters from the temperature distribution plots.

One of the important problems in welding engineering is to construct a mathematical model for the computer simulation of welding process. During the welding process, because of the heat input transferred to the material, heat transmission inside the work-piece and heat exchange with the external environment occur. Numerical simulation of heat manufacturing processes is preferred to analytical methods for modeling in welding technology. In fact as the welding arc interacts with the surface of the work-piece during its passage, very rapid series of heating and cooling cycles are achieved. Therefore it results to be difficult to adopt analytical model technique to investigate about the process. Instead numerical models are suitable to assess the thermal cycles and their relationship with process parameters. Welding was done with different modes to analyze and predict the geometry, the shape of the seam and the depth of weld penetration. For the calculation of the thermal conditions accompanying the process of melting the metal surface, a mathematical model was used, which is based on the differential equation of heat conduction in a three-dimensional Cartesian coordinate system.

In this work the simulation of the thermal field during the TIG welding process of VT23 titanium alloy joint is presented. The thermal analysis is concentrated on the prediction of the heat transfer in the weld. A distributed volume heat-source was validated on the basis of the comparison with the experimental specimen cross section. The temperature distribution in the overall weldment, the shape and size of the fusion zone, heat affected zone, the maximum cooling speeds in different parts of HAZ were predicted. Based on quite satisfactory results, this work shows, that FE simulations can enable faster, less costly, and more optimized product development, as well as examinations of product performance that would not be possible even using very detailed prototypes.

Key words: finite element method, mathematical modeling, thermal fields, welding.

ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ПІД ЧАС ТЕРМІЧНОГО ЦИКЛУ ЗВАРЮВАННЯ

У даній роботі досліджується скінченно-елементне моделювання термічного циклу зварювання. Метод скінченних елементів (МСЕ) є домінуючим методом дискретизації в будівельній механіці. Моделювання МСЕ сьогодні корисне для прогнозування таких речей, як форма зварювальної ванни для різних комбінацій параметрів процесу на основі графіків розподілу температури.

Однією з важливих проблем техніки зварювання є побудова математичної моделі для комп'ютерного моделювання процесу зварювання. У процесі зварювання за рахунок надходження тепла до матеріалу відбувається передача тепла всередину заготовки і теплообмін із зовнішнім середовищем. Чисельному моделюванню теплових виробничих процесів надають перевагу перед аналітичними методами моделювання в технології зварювання. Фактично, оскільки зварювальна дуга взаємодіє з поверхнею заготовки під час її проходження, досягається дуже швидка серія циклів нагрівання та охолодження. Тому важко прийняти техніку аналітичної моделі для дослідження процесу. Натомість чисельні моделі придатні для оцінки термічних циклів та їх зв'язку з параметрами процесу. Зварювання проводилося в різних режимах для аналізу та прогнозування геометрії, форми шва та глибини проплавлення шва. Для розрахунку теплових умов, що супроводжують процес плавлення поверхні металу, використано математичну модель, яка базується на диференціальному рівнянні теплопровідності в тривимірній декартовій системі координат.

У цій роботі представлено моделювання теплового поля під час процесу TIG зварювання з'єднання титанового сплаву VT23. Термічний аналіз зосереджений на прогнозуванні теплопередачі у зварному шві. Розподілене об'ємне джерело тепла підтверджено на основі порівняння з поперечним перерізом експериментального зразка. Прогнозовано розподіл температури в зварному виробі загалом, форму та розмір зони проплавлення, зони теплового впливу, максимальні швидкості охолодження в різних частинах ЗТВ. Базуючись на досить задовільних результатах, ця робота показує, що моделювання FE може забезпечити швидшу, менш дорогую та більш оптимізовану розробку продукту, а також перевірити продуктивність продукту, що було б неможливо навіть за допомогою дуже детальних прототипів.

Ключові слова: метод скінченних елементів, математичне моделювання, теплові поля, зварювання.

Introduction

The finite element method (FEM) is the dominant discretization technique in structural mechanics. The basic concept in the physical interpretation of the FEM is the subdivision of the mathematical model into disjoint (non-overlapping) components of simple geometry called finite elements or elements for short. The response of each element is expressed in terms of a finite number of degrees of freedom characterized as the value of an unknown function, or functions, at a set of nodal points. The response of the mathematical model is then considered to be approximated by that of the discrete model obtained by connecting or assembling the collection of all elements. The disconnection-assembly concept occurs naturally when examining many artificial and natural systems. For example, it is easy to visualize an engine, bridge, building, airplane, or skeleton as fabricated from simpler components. Furthermore, FEM has become a powerful tool for the numerical solution of a wide range of engineering problems. Applications range from deformation and stress analysis of automotive, aircraft, building, and bridge structures to field analysis of heat flux, fluid flow, magnetic flux, seepage, and other flow problems [1, 2].

Objective of the research

For this study high-strength titanium alloys were chosen. The use of titanium alloys has been expanding in the aerospace, power-generation, medical, chemical plants, and marine applications due to their superior mechanical and corrosion properties. This is due to several unarguable properties such as excellent corrosion resistance, bio-compatibility, good temperature performance and high specific mechanical resistance that made these alloys almost irreplaceable in many applications. Joining processes play a fundamental role in the productive scope of many industries and many welding techniques have been studied and developed to process this alloy. The main welding process for titanium alloys is gas tungsten arc welding (GTAW), also known as tungsten inert gas (TIG) welding [3-5].

One of the important problems in welding engineering is to construct a mathematical model for the computer simulation of welding process. During the welding process, because of the heat input transferred to the material, heat transmission inside the work-piece and heat exchange with the external environment occur (Fig. 1). Numerical simulation of heat manufacturing processes is preferred to analytical methods for modeling in welding technology. In fact as the welding arc interacts with the surface of the work-piece during its passage, very rapid series of heating and cooling cycles are achieved. Therefore it results to be difficult to adopt analytical model technique to investigate about the process. Instead numerical models are suitable to assess the thermal cycles and their relationship with process parameters [6-11].

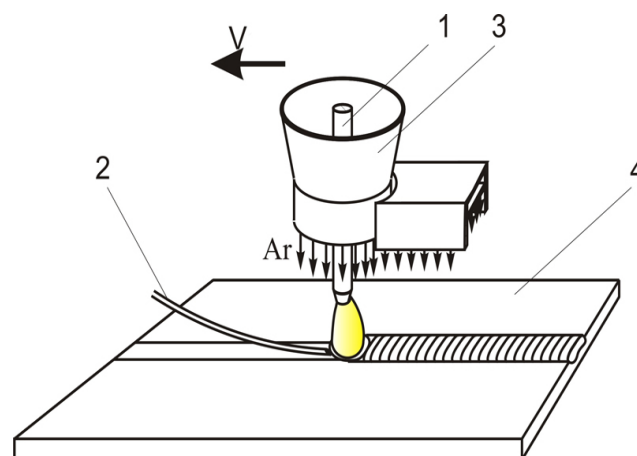


Fig.1. TIG welding process

Results

FEM simulations are nowadays useful to predict the weld pool shape for various combinations of process parameters from the temperature distribution plots. In this work the simulation of the thermal field during the TIG welding process of VT23 titanium alloy joint is presented. The thermal analysis is concentrated on the prediction of the heat transfer in the weld. A distributed volume heat-source was validated on the basis of the comparison with the experimental specimen cross section. The temperature distribution in the overall weldment, the shape and size of the fusion zone, heat affected zone, the maximum cooling speeds in different parts of HAZ were predicted. To compare simulation results with the experimental values, welding of titanium alloy VT23 was carried out. VT23 plates of size 200x100x10 mm were prepared.

Welding was done with different modes to analyze and predict the geometry, the shape of the seam and the depth of weld penetration.

For the calculation of the thermal conditions accompanying the process of melting the metal surface, a mathematical model was used, which is based on the differential equation of heat conduction in a three-dimensional Cartesian coordinate system. The finite element thermal simulation of TIG welding was performed on 10 mm thick VT23 titanium alloy. The size of model used for the experiment was 200x100x10 mm (Fig. 2).

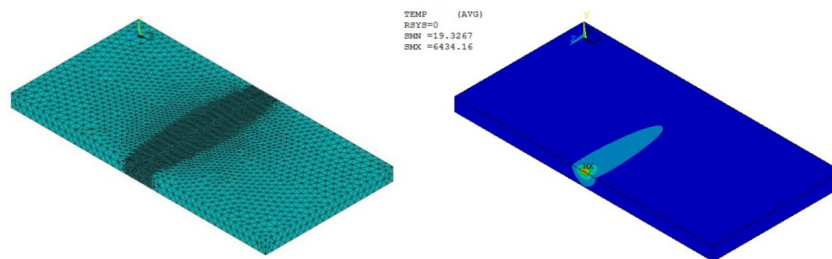


Fig. 2. Three dimensional finite element model meshes

The plate is symmetrical about the plane passing through the weld line. The geometrical model is divided into various regions. The fine mesh is made in the weld region to apply heat flux accurately. The region way from the weld line is meshed with a coarse mesh. A three-dimensional finite element mesh model as shown in Figure 3 is used for the FE analysis. 2D mesh is used for creation of heat source fitting for the thermal analysis [12].

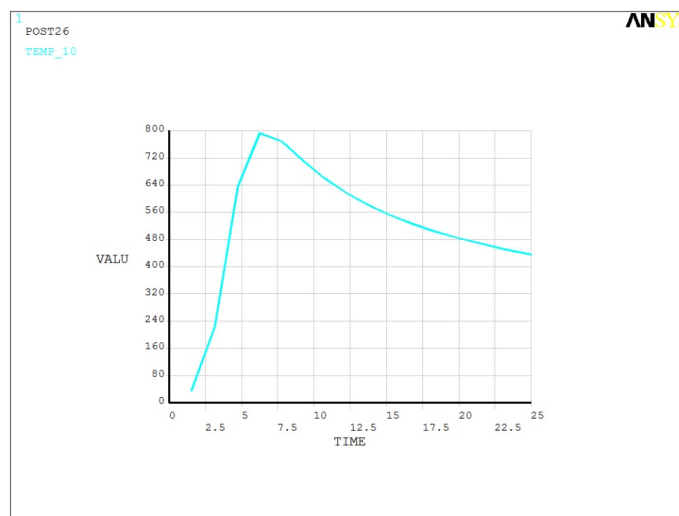


Fig. 3. Calculated welding thermal cycle

The material database is created based on the temperature related thermo-physical and mechanical properties of the material are taken from literature. The double ellipsoidal heat source parameters are obtained by the iterative manner. The obtained heat source is adjusted and saved in the function database for the use of weld wizard. After obtaining the heat source parameters for the simulation, final FE simulation is carried out using ANSYS and the results are obtained. Based on the results, isotherms of maximum temperatures were built, using which we determined geometry and dimensions of weld penetration zone, HAZ polymorphic transformation. Comparison of the results of the calculation forms of penetration zone with the experimental data showed satisfactory reproducibility.

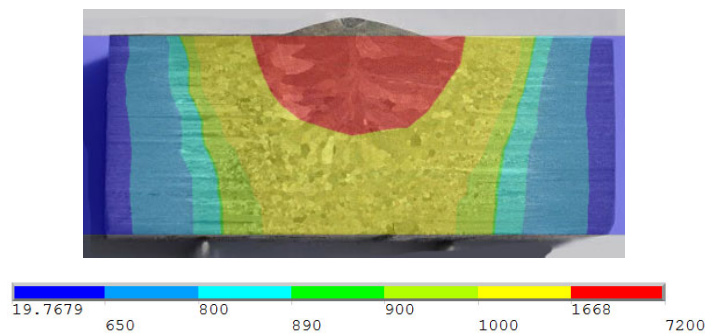


Fig. 4. Verification of developed FE model

As shown in Figure 4, developed mathematical model allowed to study effect of different welding modes and changing of welding heat input on the size and geometry of the penetration zone and heat affected zone. The simulation allowed to evaluate similarity to existing experimental results in studies related to welding processes [13], showing the temperature distribution of the work piece, and the cooling curves at the point of highest temperature and on the fusion line.

Obtained results of TIG welding using various modes are shown in Figure 5.

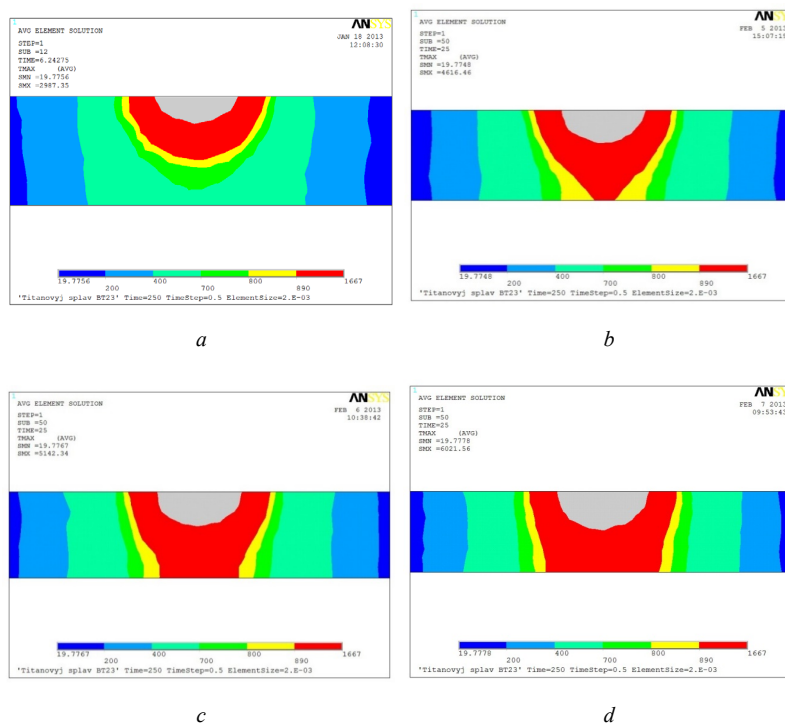


Fig. 5. Calculated data of mathematical modeling of TIG-welding:
 a – $I=220A$, $U=11V$, $\eta=0.43$; b – $I=306A$, $U=11V$, $\eta=0.43$;
 c – $I=350A$, $U=12V$, $\eta=0.43$; d – $I=420A$, $U=12V$, $\eta=0.43$

Conclusions

Finite element model was created for tungsten inert gas welding process based on differential equation of heat conduction in a three-dimensional Cartesian coordinate system. The results from the FE thermal analysis have been validated by comparing them to experimentally obtained cross-section of titanium alloy welded joint VT23. Based on quite satisfactory results, this work shows, that FE simulations can enable faster, less costly, and more optimized product development, as well as examinations of product performance that would not be possible even using very detailed prototypes.

Список використаної літератури

1. Adanowicz V.J., Dziegielewski S. Prufung und analyse geklebter verbindungen an mobeln. *Holztech-nologie*. 1976. 17(2). P. 97-100.
2. Argyris J.H. Energy theorems and structural analysis. *Aircraft Engineering*. 1955. 27: Feb.-May.
3. Axelsson O. Iterative Solution Methods. 1994. Cambridge University Press, Cambridge.
4. Donea J., Huerta A. Finite Element Methods for Flow Problems. 2003. Wiley, Chichester.
5. Hughes T., Mallet M. A new finite element formulation for computational fluid dynamics: IV. A discontinuity-capturing operator for multidimensional advective-diffusion systems. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 1986. 58(3). P. 329-336.
6. American Welding Society, Weisman C. & Kearns W.H. Welding handbook. 1976. Miami, Fl: American Welding Society.
7. Ranatowski E. Review of welding. 2002. 8-10. P. 152-155.
8. Arc welding: an overview. Welding Processes Handbook (Second edition). A volume in Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. 2012. P. 31-50.
9. Vural M. Welding Processes and Technologies. *Comprehensive Materials Processing*, edited by Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne and Bekir Yilbas, Elsevier, Oxford. 2014. P. 3-48.
10. Weman K. 1 - Arc welding – an overview. Welding Processes Handbook, Woodhead Publishing. 2003. P. 1-25.
11. Olabi A.G., Lorza R.L. and Benyounis K.Y. Quality Control in Welding Process. *Comprehensive Materials Processing*, edited by Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne and Bekir Yilbas, Elsevier, Oxford. 2014. P. 193-212.
12. Ахонин С.В. и др. Математическое моделирование структурных превращений в ЗТВ титанового сплава VT23 при сварке ТИГ. *Автоматическая сварка*. 2013. 3. С. 26-29.
13. Guimaraes P.B. Et al. Obtaining Temperature Fields as a Function of Efficiency in TIG Welding by Numerical Modeling. *Thermal Engineering*. 2011. 10. P. 50-54.

References

1. Adanowicz, V.J., & Dziegielewski, S. (1976). Prufung und analyse geklebter verbindungen an mobeln. *Holztech-nologie*. **17**(2), 97-100.
2. Argyris, J.H. (1955). Energy theorems and structural analysis. *Aircraft Engineering*. **27**: Feb.-May.
3. Axelsson, O. (1994). Iterative Solution Methods. Cambridge University Press, Cambridge.
4. Donea, J., & Huerta, A. (2003). Finite Element Methods for Flow Problems. Wiley, Chichester.
5. Hughes, T., & Mallet, M. (1986). A new finite element formulation for computational fluid dynamics: IV. A discontinuity-capturing operator for multidimensional advective-diffusion systems. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **58**(3), 329-336.
6. American Welding Society, Weisman, C., & Kearns, W.H. (1976). Welding handbook. Miami, Fl: American Welding Society.
7. Ranatowski, E. (2002). Review of welding. **8-10**, 152-155.
8. Arc welding: an overview. Welding Processes Handbook (Second edition). A volume in Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. (2012). 31-50.

9. Vural, M. (2014). Welding Processes and Technologies. *Comprehensive Materials Processing*, edited by Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne and Bekir Yilbas, Elsevier, Oxford. 3-48.
10. Weman, K. (2003). 1 - Arc welding – an overview. *Welding Processes Handbook*, Woodhead Publishing. 1-25.
11. Olabi, A.G., Lorza, R.L., & Benyounis, K.Y. (2014). Quality Control in Welding Process. *Comprehensive Materials Processing*, edited by Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne and Bekir Yilbas, Elsevier, Oxford. 193-212.
12. Ahonin, S.V. i dr. (2013). Matematicheskoe modelirovanie strukturnyih prevrascheniy v ZTV titanovogo splava VT23 pri svarke TIG. *Avtomaticheskaya svarka*. **3**, 26-29.
13. Guimaraes, P.B. Et al. (2011). Obtaining Temperature Fields as a Function of Efficiency in TIG Welding by Numerical Modeling. *Thermal Engineering*. **10**, 50-54.

Гумен Олена Миколаївна – д.т.н., професор кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: gumens@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3992-895X.

Селіна Ірина Борисівна – старший викладач кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: irinaselina2016@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4010-3819.

Т.С. КАГАДІЙ, А.Г. ШПОРТА
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
О.В. БІЛОВА
Український державний університет науки і технологій
І.В. ЩЕРБИНА
Дніпровський державний аграрно-економічний університет

ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ПРИ МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ

Актуальність та затребуваність аналітичних та чисельно-аналітичних підходів в задачах сучасної теорії пружності, пов'язаних з врахуванням нелінійності матеріалів, не викликає жодних сумнівів. Така поведінка притаманна композиційним матеріалам різних видів (армований бетон, склопластики). Нелінійність має бути врахована, наприклад, при складному навантаженні, впливі зовнішнього середовища, екстремальному згині конструкції та ін. З цієї точки зору дуже важливою для розвитку сучасних технологій проектування і будівництва є розробка аналітичних методів, оскільки вони одразу дозволяють побачити обґрунтовані наближені результати, а також можуть слугувати для перевірки чисельних розрахунків.

Автори у своїх попередніх роботах [1] вже розглядали плоскі та просторові задачі з урахуванням геометричної нелінійності. Потрібно зазначити, що запропонований підхід може бути застосований до розв'язання задач, в яких залишкові деформації відіграють значну роль (згин тонких пластин та оболонок). Дуже важливим моментом є верифікація отриманих результатів, оцінка адекватності та точності розроблених методів. Автори роботи завжди приділялась особлива увага цим питанням. Запропонований А.В. Павленком та розвинутий його учнями підхід [2-4] багаторазово проходив апробацію на задачах різного рівня складності. Заснований на ідеях асимптотичного інтегрування за малим параметром, що пов'язаний з фізичними характеристиками матеріалу, метод дозволив звести задачі лінійної теорії пружності до послідовного розв'язування задач теорії потенціалу, що є найбільш розвинутим розділом математичної фізики. Застосування даного підходу дає змогу розв'язати ряд нових складних задач, серед переваг можна вказати і можливість аналізувати напружено-деформований стан багатошарових тіл з підкріплюючими елементами.

В запропонованій статті за допомогою розробленого авторами підходу розв'язуються задачі для фізично нелінійних матеріалів, в яких закони деформування не відповідають закону Гука, тобто залежність між напруженнями та деформаціями є нелінійною. Крім того, враховується циліндрична анізотропія матеріалу тіл взаємодії.

Ключові слова: асимптотичний метод, малий параметр, фізична нелінійність, циліндрична анізотропія, модельна задача.

T.S. KAGADIY, A.H. SHPORTA
Dnipro University of Technology
O. BILOVA
Ukrainian State University of Science and Technology
I. SCHERBINA
Dnipro State Agrarian and Economic University

CONSIDERATION OF NONLINEAR PROPERTIES OF MATERIALS IN MATHEMATICAL MODELING

The relevance and demand of analytical and numerical-analytical approaches in the problems of the modern theory of elasticity, related to taking into account the nonlinearity of materials, does not cause any doubts. This behavior is characteristic of composite materials of various types (reinforced concrete, fiberglass). Non-linearity must be taken into account, for example, with complex loading, the influence of the external environment, extreme bending of the structure, etc. From this point of view, the development of analytical methods is very important for the development of modern design and construction technologies, as they immediately allow you to see reasonable approximate results, and can also serve to check numerical calculations.

The authors in their previous works [1] already considered planar and spatial problems taking into account geometric nonlinearity. It should be noted that the proposed approach can be applied to solving problems in which residual deformations play a significant role (bending of thin plates and shells). A very important point is the verification of the obtained results, assessment of the adequacy and accuracy of the developed methods. The authors of the work

always paid special attention to these issues. Proposed by A.V. Pavlenko and the approach developed by his students [2-4] has been repeatedly tested on problems of different levels of complexity. Based on the ideas of asymptotic integration for a small parameter related to the physical characteristics of the material, the method made it possible to reduce the problems of the linear theory of elasticity to the sequential solution of the problems of the potential theory, which is the most developed branch of mathematical physics. The application of this approach makes it possible to solve a number of new complex problems, among the advantages it is possible to specify the possibility of analyzing the stress-strain state of multilayer bodies with reinforcing elements.

In the proposed article, using the approach developed by the authors, problems are solved for physically nonlinear materials in which the laws of deformation do not correspond to Hooke's law, that is, the dependence between stresses and deformations is nonlinear. In addition, the cylindrical anisotropy of the material of the interaction bodies is taken into account.

Keywords: asymptotic method, small parameter, physical nonlinearity, cylindrical anisotropy, model problem.

Постановка проблеми

Загальні співвідношення нелінійної теорії пружності моделюють настільки складні процеси, що в інженерній практиці ними користуються не часто, оскільки виникає потреба в обґрунтуванні постановки задач, а після застосування чисельних методів у верифікації результатів. У зв'язку з цим велике значення має розробка наближених чисельно-аналітичних та аналітичних підходів, що враховують особливості поведінки окремих видів конструкцій та їх елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Особливості фізично нелінійної теорії пружності були сформульовані Р. Каудерером, який отримав на її основі розв'язання широкого кола задач. Свій подальший розвиток фізично нелінійна теорія отримала в роботах Г. А. Генієва, А. А. Ільюшина, Л. М. Качанова та інших вчених. Метою досліджень останніх років є врахування складних властивостей матеріалів, що наближає математичну модель до реальних задач [4-8]. Наприклад, в [4-8] запропоновані методи розв'язання контактних задач з врахуванням складних властивостей матеріалів (включення, нелінійність, в'язкопружність, анізотропія). Узагальнений авторами та заснований на ідеях асимптотичного інтегрування за малим параметром, що пов'язаний з фізичними характеристиками матеріалу, метод дозволив звести задачі лінійної теорії пружності (в'язкопружності) до послідовного розв'язування задач теорії потенціалу. Розвиток та поширення класів задач та методів їх розв'язання із урахуванням фізично нелінійних особливостей матеріалів висвітлено в роботах [6-10].

Мета дослідження

Зазвичай в складних випадках розв'язання задач асимптотичним методом обчислюється тільки перше наближення, іноді друге. Головний зміст другого наближення – це краще зрозуміти перше. Але вже після першого етапу обчислень метод дає задовільні результати. Такий висновок щодо точності запропонованого підходу неодноразово доводився на класичних прикладах, що дозволяють порівняння. Мета цієї роботи – розвинути метод збурення, ефективність якого вже неодноразово доводилась, на випадок анізотропних матеріалів з фізичною нелінійністю.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі [5] метод застосовано до плоских задач, де враховується криволінійна анізотропія матеріалу. В якості модельної розглянута задача про одновісне розтягнення анізотропної пластини з круговим отвором. Контур отвору вільний від зовнішніх зусиль, а на нескінченності на пластину діють розтягуючі зусилля з інтенсивністю p . Загальний розв'язок задачі відносно напружень має вигляд

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2} \right) + \frac{p}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{r} - \varepsilon (1 + \varepsilon^{-1/2}) \left(\frac{1}{r^{1-\varepsilon}} - \frac{1}{r} \right) + O(\varepsilon^2) \right\} \cos 2\theta,$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left(1 + \frac{1}{r^2} \right) - \frac{p}{2} \left\{ 1 + (1 + \varepsilon^{-1/2}) \frac{1}{r^{(1+\varepsilon^{-1})}} + \varepsilon \left((1 + \varepsilon^{-1/2}) \frac{1}{r^{(1+\varepsilon^{-1})}} - \frac{1}{r^{(1-\varepsilon)}} \right) + O(\varepsilon^2) \right\} \cos 2\theta,$$

$$\tau_r = -\frac{p}{2} \left\{ 1 - \varepsilon^{1/2} \left[(1 + \varepsilon^{-1/2}) \frac{1}{r^{(1+\varepsilon^{-1})}} - \frac{1}{r} + \varepsilon (1 + \varepsilon^{-1/2}) \left(\frac{1}{r^{(1+\varepsilon^{-1})}} - \frac{1}{r^{(1-\varepsilon)}} \right) + O(\varepsilon^2) \right] \right\} \sin 2\theta.$$

де ε – малий параметр. Останні формули – це перші члени розвинення точного розв'язку в ряд за степенями ε . На контурі отвору криволінійно-анізотропної пластини напруження мають вигляд:

$$\sigma_r = 0, \quad \tau_r = 0, \quad \sigma_\theta = p - \frac{p}{2} \left[(2 + \varepsilon^{-1/2}) + \varepsilon (\varepsilon^{-1/2}) + O(\varepsilon^2) \right] \cos 2\theta.$$

$$\text{При } \theta = \frac{\pi}{2} \quad (\sigma_\theta)_{\max} = p + \frac{p}{2} \left[(2 + \varepsilon^{-1/2}) + \varepsilon (\varepsilon^{-1/2}) + O(\varepsilon^2) \right].$$

У таблиці 1 наведені порівняння нульового наближення, отриманого запропонованим методом, з відомим точним результатом для максимального напруження на контурі отвору. При цьому похибка для $(\sigma_\theta)_{\max}$ на контурі ($\xi = 0$) не перебільшує 1% при $\varepsilon = 1/4$ і буде менше 0,3% при $\varepsilon = 1/9$.

Таблиця 1

Порівняння асимптотичного та точного розв'язків для максимального напруження на контурі отвору

ε	Відомий розв'язок	Точний розв'язок	Асимптотичний розв'язок	Похибка
1/3 (ізотропний матеріал)	3p	3p	2,85p	≈ 5%
1/4	–	3,22p	3,25p	≈ 0,93%
1/9	–	3,658p	3,667p	≈ 0,24%

Навіть в найбільш несприятливому для запропонованого підходу випадку ізотропного матеріалу (параметр ε найбільший) похибка не перебільшує 5%.

Ефективність запропонованого підходу, достатньо висока точність результатів привела до ідеї узагальнення методу на випадок нелінійних матеріалів, зокрема для таких, де має місце відхилення від закону Гука. Вони відіграють значну роль в сучасній техніці. Це можуть бути в'язкопружнопластичні матеріали, або деякі змодельовані матеріали зі швидкою зміною властивостей та ін. Зв'язок між деформаціями та напруженнями при цьому може бути різноманітним, і відповідні задачі механіки, як правило, приводять до нездоланих математичних труднощів. В той же час, застосування таких матеріалів потребує розробки методів математичного моделювання для розв'язування практично важливих задач та виявленню додаткових резервів міцності матеріалу.

Фізична нелінійність матеріалу може по різному відобразитися у виразах зв'язку деформацій та напружень. Класичний випадок, коли нелінійна частина записана у явному вигляді у дотичних напруженнях:

$$\sigma_{11} = A_1 e_{11}, \sigma_{22} = A_2 e_{22}, \sigma_{12} = A_{12} (e_{12} + C_2 e_{12}^\kappa), \quad (\kappa > 1)$$

де C_2 – деяка стала.

Узагальнення методу збурень було розроблено для випадку, коли закон між напруженнями та деформаціями записаний наступними аналітичними залежностями:

$$\sigma_{11} = A_1 (u_x)^\kappa, \quad \sigma_{22} = A_2 (\vartheta_y)^\kappa, \quad \delta_{12} = A_{12} (u_y + \vartheta_x)^\kappa, \quad (1)$$

де $A_1, A_2 (A_{12})$ – сталі матеріалу, аналоги модулів пружності (зсуву) в лінійному ортотропному

пружному матеріалі вздовж головних напрямків анізотропії, що співпадають з декартовими координатами x, y ; κ – стала.

Після підстановки у рівняння рівноваги виразів (1) маємо

$$\begin{aligned} (u_x)_x^\kappa + \varepsilon_0 (u_y + \vartheta_x)_y^\kappa &= 0, & \varepsilon_0 (u_y + \vartheta_x)_x^\kappa + q(\vartheta_y)_y^\kappa &= 0, \\ (\varepsilon_0 = A_{12} / A_1, q = A_2 / A_1). \end{aligned}$$

Питання про визначення напружено-деформованого стану пружного фізично нелінійного ортотропного тіла зводиться до інтегрування рівнянь рівноваги і сумісності деформацій при відповідних крайових умовах.

Для реальних ортотропних матеріалів $\varepsilon_0 < 1$ і цей параметр можна розглядати як малий.

Врахування криволінійної анізотропії викликає додаткові труднощі. Розглянуто напружено-деформований стан пластинки з криволінійною анізотропією, головні напрямки якої співпадають з криволінійними ізометричними координатами ξ, η :

$$\begin{aligned} x = \operatorname{Re}[\omega(\zeta)] = x(\xi, \eta), & \quad y = \operatorname{Im}[\omega(\zeta)] = y(\xi, \eta), \quad z = \omega(\zeta), \\ (z = x + iy, \zeta = e^{\xi+i\eta}, i = \sqrt{-1}) \end{aligned} \tag{2}$$

Для випадку полярних координат (циліндрична анізотропія) маємо

$$\begin{aligned} \omega(\zeta) = R\zeta, x = \operatorname{Re}^\xi \cos \eta, & \quad y = \operatorname{Re}^\xi \sin \eta; H = \operatorname{Re}^\xi, \\ \Gamma_{11}^1 = \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial \xi} = 1, \Gamma_{22}^2 = \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial \eta} = 0, & \quad R = \operatorname{const}. \end{aligned} \tag{3}$$

H – параметр Ламе.

Враховуючи залежності (1) та рівняння

$$e_{11} = \frac{1}{\operatorname{Re}^\xi} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \right), e_{22} = \frac{1}{\operatorname{Re}^\xi} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + u \right), e_{12} = \frac{1}{\operatorname{Re}^\xi} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \eta} - v \right),$$

одержимо

$$\begin{aligned} \sigma_{11} = A_1 R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^\kappa, & \quad \sigma_{22} = A_2 R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + u \right)^\kappa, \\ \sigma_{12} = A_{12} R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \eta} - v \right)^\kappa, \end{aligned} \tag{4}$$

Тоді рівняння рівноваги набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^\kappa + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \xi} - v \right)^\kappa - q \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + u \right)^\kappa + (1 - \kappa) \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^\kappa &= 0, \\ q \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + u \right)^\kappa + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \eta} - v \right)^\kappa - \varepsilon_0 (2 - \kappa) \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \eta} - v \right)^\kappa &= 0. \end{aligned} \tag{5}$$

Після розщеплення напружено-деформованого стану на дві складові з різними властивостями у нульовому наближенні за малим параметром ε_0 маємо

$$\begin{aligned} (U_{\xi_1}^{1,0})_{\xi_1}^\kappa + (U_{\eta_1}^{1,0})_{\eta_1}^\kappa - q(V_{\eta_1}^{1,0})_{\eta_1}^\kappa &= 0, q(V_{\eta_1}^{1,0})_{\eta_1}^\kappa = 0 \\ \sigma_{11}^{1,0} = \varepsilon_0^{-\frac{\kappa}{1+\kappa}} A_1 R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi_1} (U_{\xi_1}^{1,0})_{\xi_1}^\kappa, & \quad \sigma_{22}^{1,0} = \varepsilon_0^{-\kappa} A_2 R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi_1} (V_{\eta_1}^{1,0})_{\eta_1}^\kappa, \\ \sigma_{12}^{1,0} = \varepsilon_0^{-\kappa} A_{12} R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi_1} (U_{\eta_1}^{1,0})_{\eta_1}^\kappa & \\ (U_{\xi_2}^{2,0})_{\xi_2}^\kappa = 0, q(V_{\eta_2}^{2,0})_{\eta_2}^\kappa + (V_{\xi_2}^{2,0})_{\xi_2}^\kappa &= 0, \\ \sigma_{11}^{2,0} = \varepsilon_0^{-\kappa} A_1 R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi_2} (U_{\xi_2}^{2,0})_{\xi_2}^\kappa, & \quad \sigma_{22}^{2,0} = \varepsilon_0^{-\frac{\kappa}{1+\kappa}} A_2 R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi_2} (V_{\eta_2}^{2,0})_{\eta_2}^\kappa, \\ \sigma_{12}^{2,0} = \varepsilon_0^{-\kappa} A_{12} R^{-\kappa} e^{-\kappa \xi_2} (V_{\xi_2}^{2,0})_{\xi_2}^\kappa. \end{aligned}$$

Вважаючи $\kappa = 1 - \varepsilon_1$, де ε_1 – ще один малий параметр, введемо нові незалежні змінні

$$\xi_1^* = \xi_1 + \phi_1(\xi_1, \eta_1), \quad \eta_1^* = \eta_1 + \Psi_1(\xi_1, \eta_1), \quad (6)$$

Після знаходження функцій U, V, φ, ψ у вигляді рядів за параметром ε_1 у нульовому та першому наближеннях, як і для лінійно пружних матеріалів, приходимо до інтегрування рівнянь Лапласа відносно основних функцій. Доведена можливість постановки крайових задач для основних функцій.

Якщо напружено-деформований стан не залежить від координати η , тоді рівняння (5) набувають вигляду

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\xi} \left(\frac{du}{d\xi} \right)^\kappa - q(u)^\kappa + (1 - \kappa) \left(\frac{du}{d\xi} \right)^\kappa &= 0, \\ \frac{d}{d\xi} \left(\frac{dv}{d\xi} - v \right)^\kappa + (2 - \kappa) \left(\frac{dv}{d\xi} - v \right)^\kappa &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

При цьому

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= A_1 R^{-\kappa} e^{-\kappa\xi} \left(\frac{du}{d\xi} \right)^\kappa, \quad \sigma_{22} = A_2 R^{-\kappa} e^{-\kappa\xi} u, \\ \sigma_{12} &= A_{12} R^{-\kappa} e^{-\kappa\xi} \left(\frac{dv}{d\xi} - v \right)^\kappa. \end{aligned} \quad (8)$$

Якщо дотичні напруження дорівнюють нулю, тоді система (7) переходить в одне рівняння

$$\frac{d}{d\xi} \left(\frac{du}{d\xi} \right)^\kappa - q(u)^\kappa + (1 - \kappa) \left(\frac{du}{d\xi} \right)^\kappa = 0. \quad (9)$$

Розшукуючи u у вигляді рядів за параметром ε_1 , одержимо, що в кожному наближенні треба розв'язувати звичайне лінійне диференціальне рівняння, у правій частині якого містяться відомі функції, знайдені в попередніх наближеннях.

Якщо переміщення $u = 0$, тоді система (7) переходить в рівняння

$$\frac{d}{d\xi} \left(\frac{dv}{d\xi} - v \right)^\kappa + (2 - \kappa) \left(\frac{dv}{d\xi} - v \right)^\kappa = 0, \quad (10)$$

а співвідношення (8) мають вигляд

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0, \quad \sigma_{12} = A_{12} R^{-\kappa} e^{-\kappa\xi} \left(\frac{dv}{d\xi} - v \right)^\kappa.$$

Загальний розв'язок рівняння (10) легко знаходиться:

$$v = -C \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right)\xi} + C_1 e^\xi,$$

де C, C_1 – довільні сталі, що визначаються з крайових умов.

Розглянуто приклад про напружено-деформований стан ортотропної пластини з циліндричною анізотропією, що послаблена круговим отвором радіусу R , при всебічному розтягванні на нескінченності зусиллями інтенсивності p . Контур отвору вільний від зовнішнього навантаження. Знайдено розв'язки для переміщень та напружень у нульовому та першому наближеннях. Зокрема, на контурі отвору ($\xi = 0$) $\sigma_{11} = 0$, $\sigma_{12} = 0$

$$\sigma_{22} = p \left[1 + \sqrt{q} - \varepsilon_1 \left(\frac{1 + \sqrt{q}}{2} - \frac{\sqrt{q}}{4} \ln q \right) + o(\varepsilon_1^2) \right],$$

а при $q = 0$,

$$\sigma_{22} = p \left[2 - \varepsilon_1 + o(\varepsilon_1^2) \right].$$

Якщо $\varepsilon_1 = 0$, то приходимо до лінійної задачі і одержуємо класичне для цього випадку значення концентрації напружень, що дорівнює двом.

У випадку, коли на контурі отвору ($\xi = 0$) задані дотичні напруження $\sigma_{12} = T_0$, а на нескінченності напруження дорівнюють нулю, дотичне напруження та компонента зміщення v визначаються з формул

$$\sigma_{12} = T_0 e^{-2\xi}, v = -R \left(\frac{T_0}{A_{12}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \frac{\kappa}{2} e^{-\left(\frac{2}{\kappa}-1\right)\xi}.$$

Якщо пластина має вигляд кільця, на внутрішньому контурі якого ($\xi = 0$) $\sigma_{12} = T_0$, а на зовнішньому ($\xi = \xi_0$) $v = 0$, маємо

$$\sigma_{12} = T_0 e^{-2\xi}, v = R \left(\frac{T_0}{A_{12}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \frac{\kappa}{2} e^{\xi} \left(e^{-\frac{2}{\kappa}\xi} - e^{-\frac{2}{\kappa}\xi_0} \right).$$

Коли на внутрішньому контурі кільця ($\xi = 0$) задане переміщення $v = v_0$, а на зовнішньому контурі ($\xi = \xi_0$) $v = 0$, тоді розв'язок набуває вигляду

$$v = \frac{v_0 e^{\xi}}{e^{-\frac{2}{\kappa}\xi_0} - 1} \left(e^{-\frac{2}{\kappa}\xi_0} - e^{-\frac{2}{\kappa}\xi} \right), \sigma_{12} = A_{12} \left(2v_0 / \kappa R \left(e^{-\frac{2}{\kappa}\xi_0} - 1 \right) \right)^{\kappa} e^{-2\xi}.$$

Висновки

Наведені розв'язки модельних задач та виконані можливі граничні переходи доводять ефективність запропонованого узагальнення метода збурень на випадок врахування нелінійних властивостей матеріалів.

Список літератури

1. Кагадій Т.С., Білова О.В., Щербина І.В., Шпорта А.Г. Математичне моделювання в задачах геометрично нелінійної теорії пружності. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2021. Т.3. №2.1.С. 107-117.
2. Маневич Л. И., Павленко А. В. Асимптотический метод в микромеханике композиционных материалов. К: Вища школа, 1991.131 с.
3. Кагадій Т.С. Метод возмущений в механике упругих (вязкоупругих) анизотропных и композиционных материалов. Дніпропетровск: РИК НГА України, 1998. 260 с.
4. Кагадій Т.С., Шпорта А.Г., Білова О.В., Щербина І.В. Напружено-деформований стан шаруватой основи з підкріплюючим елементом. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2020. Т.3. № 2.1. С. 107-116.
5. Кагадій Т.С., Білова О.В., Щербина І.В. Застосування методу малого параметру при моделюванні задач теорії в'язкопружності. *Вісник Херсонського національного університету*. 2019. № 2(69). Ч.3. С. 69-76.
6. Білова О.В., Кагадій Т.С., Щербина І.В. Аналитическое решение плоских задач о передаче нагрузки. *Вісник Запорізького Національного Університету, серія ф.-м. науки*. 2017. № 1. С. 168-175.
7. Кіт Г. С. Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. Львів: Ін-т прикл. пробл. мех. і мат. НАН України, 2000. Т. 1. 401 с.
8. Математичні проблеми механіки неоднорідних структур / ред.: І. О. Луковський, Г. С. Кіт, Р. М. Кушнір. Львів : Ін-т приклад. проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2014. 412 с.
9. Клиндухов В.В. Вдавливание осесимметричного штампа в неоднородный по глубине слой. *Изв. РАН. Механика твердого тела*. 2006. № 1. С. 5–9.
10. Wriggers P., Nackenhorst U. Analysis and Simulation of Contact Problems. LNACM Vol. 27, Berlin–Heidelberg: Springer, 2006. 408 p.

11. Sofonea M., Matei A. *Mathematical Models in Contact Mechanics*. New York: Cambridge University Press, 2012. 295 p.

References

1. Kahadii, T.S., Bilova, O.V., Shcherbyna, I.V., & Shporta, A.H. (2021). Matematychnе modeliuvannia v zadachakh heometrychno neliniinoi teorii pruzhnosti. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia*. **3** (2.1), 107-117.
2. Manevich, L. I., & Pavlenko, A. V. (1991). *Asimptoticheskiy metod v mikromehanike kompozitsionnykh materialov*. K: Vischa shkola.
3. Kagadiy, T.S. (1998). *Metod vozmuscheniy v mehanike uprugih (vyazkouprugih) anizotropnykh i kompozitsionnykh materialov*. DnIproptetrovsk: RIK NGA UkraYini.
4. Kahadii, T.S., Shporta, A.H., Bilova, O.V., & Shcherbyna, I.V. (2020). Napruzhenno-deformovanyi stan sharuvatoi osnovy z pidkripliuuchym elementom. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia. KhNTU*. **3** (2.1), 107-116.
5. Kahadii, T.S., Bilova, O.V., & Shcherbyna, I.V. (2019). Zastosuvannia metodu maloho parametru pry modeliuvanni zadach teorii v'iazkopruzhnosti. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho universytetu*. **2** (69). Ch.3, 69-76.
6. Bilova, O.V., Kahadii, T.S., & Shcherbyna, I.V. (2017). Analytycheskoe reshenye ploskykh zadach o peredache nahruzky. *Visnyk Zaporozhskoho Natsionalnoho Universytetu, seriia f.-m. nauky*. **1**, 168-175.
7. Kit, H. S. (2000). *Matematychni problemy mekhaniky neodnorodnykh struktur*. Lviv: In-t prykl. probl. mekh. i mat. NAN Ukrainy. T. 1.
8. *Matematychni problemy mekhaniky neodnorodnykh struktur / red.: Lukovskyi, I. O., Kit, H. S., & Kushnir, R. M.* (2014). Lviv : In-t pryklad. problem mekhaniky i matematyky im. Ya. S. Pidstryhacha NAN Ukrainy.
9. Klinduhov, V.V. (2006). Vdavlivanie osesimmetrichnogo shtampa v neodnorodnyiy po glubine sloy. *Izv. RAN. Mehanika tverdogo tela*. **1**, 5–9.
10. Wriggers, P., & Nackenhorst, U. (2006). *Analysis and Simulation of Contact Problems*. LNACM Vol. 27, Berlin–Heidelberg: Springer.
11. Sofonea, M., & Matei, A. (2012). *Mathematical Models in Contact Mechanics*. New York: Cambridge University Press.

Кагадій Тетяна Станіславівна - доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», e-mail: tkagadiy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6116-4971

Білова Оксана Вікторівна - кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики Українського державного університету науки і технологій, e-mail: okbelova00@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6258-6164

Щербина Ірина Володимирівна - кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики і фізики Дніпровського державного аграрно-економічного університету, e-mail: sherbinaiv@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3968-4326

Шпорта Анна Григорівна - кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» державний вищий навчальний заклад НТУ «Дніпровська політехніка», e-mail: shportaanna@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1260-7358

**АДЕКВАТНІСТЬ ПРОЦЕСУ ПОБУДОВИ СЕМАНТИЧНОЇ МОДЕЛІ
ДОКУМЕНТУ НА ОСНОВІ НЕСТРУКТУРОВАНОЇ БАЗИ ЗНАНЬ**

Розробка прикладних програмних систем автоматичної обробки текстів має на увазі вибір того чи іншого механізму опису та реалізації моделі природної мови, доступної для обробки ЕОМ. Оскільки, мова є досить неформалізованою системою з нестабільністю і неоднорідністю власних правил, то головною проблемою при реалізації таких моделей є складність опису семантичних характеристик тексту на рівні алгоритмічного уявлення. У дисертаційній роботі [1] був реалізований підхід до побудови програмної семантичної моделі документа, яка базується на структурі гібридної семантичної мережі. Необхідність і важливість цієї моделі виходить насамперед із аналізу існуючих аналогів і алгоритмічних підходів до побудови семантичних мереж документа – усі вони або базуються на словниках, або не пророблені для флективно багатих груп мови. Розроблений підхід базується на алгоритмі латентно-семантичного аналізу, що дозволяє знаходити семантичні відповідності на основі вагових характеристик тексту і роботі з проєкціями координат для базових текстових одиниць на двомірній площині. Використання такого підходу до роботи із семантичними характеристиками тексту є інноваційним не тільки тому, що сфера застосування латентно-семантичного аналізу в першу чергу стосується задач класифікації документів, тоді як у нашій моделі його використання було змінено, і ми наближаємо не документ до терміну, а речення з документів до термінів документа, а і тому, що алгоритм поєднує у собі багато специфічних додаткових етапів, що є нетиповими для підходів побудови семантичної моделі документа. Мова йде про використання алгоритмів кластеризації, із відповідними методами для визначення необхідних для неї параметрів, алгоритмів синтаксичного, морфологічного і просторового аналізу даних [1]. Отриманий підхід дозволяє будувати семантичні моделі наукових текстів без будь-якої попередньої семантичної розмітки або складання семантичних словників, які містять у своєму складі кількісні показники семантичних характеристик тексту, що значно спрощує процес побудови систем автоматичної обробки текстів. Дослідження, проведене у даній статті стосується перевірки спроможності моделі виконувати своє функціональне призначення, шляхом побудови її критеріїв адекватності і перевірки їх виконання шляхом проведення відповідних експериментів.

Ключові слова: семантична мережа, автоматична обробка тексту, система запит-відповідь, генерація тексту.

Y.R. KOVULIN
Alfred Nobel University**ADEQUACY OF THE PROCESS OF BUILDING THE SEMANTIC MODEL
OF THE DOCUMENT BASED ON AN UNSTRUCTURED KNOWLEDGE BASE**

The development of applied software systems for automatic text processing implies the choice of one or the other mechanism for describing and implementing a natural language model available for computer processing. Since language is a rather unformalized system with instability and heterogeneity of its own rules, the main problem in the implementation of such models is the difficulty of describing the semantic characteristics of the text at the level of algorithmic representation. An approach to building a programmatic semantic model of a document, which is based on the structure of a hybrid semantic network, was implemented in the dissertation [1]. The necessity and importance of this model comes primarily from the analysis of existing analogues and algorithmic approaches to the construction of semantic networks of a document. All of them are either based on dictionaries or have not been developed for language groups with a rich inflectional morphology. The developed approach is based on the algorithm of latent semantic analysis, which allows finding semantic correspondences based on weight characteristics of the text and working with coordinate projections for basic text units on a two-dimensional plane. The use of such an approach to work with the semantic characteristics of the text is innovative not only because the algorithm combines many specific additional stages that are atypical for approaches to building a semantic model of a document, but also because the scope of application of latent semantic analysis primarily concerns the tasks of document classification, while in our model, its use has been changed, and we approach not the document to the term, but the sentence from documents to document terms. It is a question of the use of clustering algorithms with appropriate methods for determining the necessary parameters for it, algorithms of syntactic, morphological and spatial data analysis [1]. The obtained approach makes it possible to build semantic models of scientific texts without any previous semantic marking or compilation of semantic dictionaries, which contain quantitative indicators of the semantic characteristics of the text, which greatly simplifies the process of building

automatic text processing systems. The research carried out in this article concerns the verification of the model's ability to fulfill its functional purpose by constructing its adequacy criteria and the verification of their implementation by conducting relevant experiments.

Keywords: semantic network, automatic text processing, request-response system, text generation.

Постановка проблеми

Головною складністю впровадження процесу автоматичної обробки текстів у прикладні програмні продукти є необхідність побудови семантичної моделі документів, доступної для обробки комп'ютером. Окремо слід відзначити ускладнення, пов'язане із властивостями флексії та типології порядку слів мови документа, через що моделі, створені, наприклад, для англійської мови, не є застосовними для документів слов'янською мовою. Через це, головним підходом до створення семантичних моделей документів слов'янськими мовами є ручна побудова семантичної структури тексту, яка може бути представлена у вигляді онтологічної розмітки або семантичних словників, і вимагає використання великого обсягу ручної праці для їх складання і пошуку фахівців у прикладній лінгвістиці. Це значно ускладнює використання автоматичної обробки текстів та обмежує застосування моделі для довільної колекції семантично неструктурованих текстів. Питання розробки схожих моделей уявлення текстів для їх подальшої комп'ютерної обробки подані у багатьох роботах, які стосуються галузей штучного інтелекту, математичного моделювання та обробки природної мови. Серед вітчизняних вчених слід відзначити наукові розробки Н.Н. Леонтьєвої, М.В. Мозгового, В.А. Тузова, І.О. Мельчука, Ю.Д. Апресяна, спрямовані на математичне моделювання семантичних властивостей тексту на основі онтологій та семантичних словників. Зарубіжні англомовні моделі представлення текстів відштовхуються від жорсткого порядку слів у мові, як наприклад в роботах N. Chomsky. Проведений аналіз наявної у відкритому доступі науково-технічної літератури і документації показав, що існуючі моделі представлення слов'яномовних текстів спрямовані саме на опис структурованих знань, і не дозволяють повністю автоматизувати процес опису семантичних властивостей та адаптивного додавання неструктурованих знань до пошукової системи. Усі вони мають на увазі залучення значної кількості лінгвістичних знань і використання попередньої семантичної розмітки, створеної лінгвістом-експертом вручну. З іншого боку, зарубіжні моделі орієнтовані в першу чергу на обробку англомовних текстів і не можуть бути застосовані для представлення слов'яномовних текстів. Таким чином, відсутність цілком автоматичних моделей представлення слов'яномовних текстів дозволяє зробити висновок про те, що на сьогоднішній день задачі розробки семантичної моделі документа на основі неструктурованої бази знань і перевірки її адекватності є актуальними і практично значимими.

Мета дослідження

Розробити критерії адекватності математичної моделі представлення семантичних властивостей текстів на основі неструктурованої бази знань, та довести її спроможність працювати із семантичними характеристиками тексту шляхом виконання відповідних експериментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перевірка адекватності розробленої семантичної моделі тексту і розробленої на її основі прикладної програмної системи викликає ряд складнощів. Справа в тому, що класичні семантичні мережі, які використовуються для онтологізації бази знань тестуються порівнянням із деяким «золотим стандартом», відносно якого і вираховуються критерії успішності побудови семантичної мережі [2]. Проте, у нашому випадку, такий підхід може використовуватися лише при безпосередньому застосуванні отриманої моделі, що відсуне питання її семантичних властивостей в цілому на другий план. Важливішим же питанням, що постає на цьому етапі, є перевірка залежності моделі саме від семантичних характеристик тексту, а не від його статистичного

частотного портрету. Тому було прийнято рішення про проведення ряду експериментів, спрямованих, в першу чергу, на спробу ввести систему в оману, будуючи моделі семантично невірних документів і порівнювати їх з отриманими результатами для коректних текстів.

Виходячи з цього, найбільш показовою перевіркою є зіставлення із автоматично згенерованим текстом, а саме, обробка тексту, побудованого за допомогою автоматичного SEO-генератора тексту. Генератор тексту – це комп'ютерна програма, що створює тексти, коректні з точки зору більшості норм мови, але, як правило, позбавлені сенсу [3]. Іноді у читача, який працює із згенерованим такою програмою текстом, може скластися враження, що цей текст є осмисленим і семантично пов'язаним, особливо якщо текст має тематику, з якою читач слабо ознайомлений. Існують різні види генераторів тексту, що розрізняються своїми можливостями (наприклад, деякі з них можуть самостійно формувати нові слова). Генерація тексту шляхом складання з повністю випадкових слів дає сміттєвий результат, безглуздий для розуміння людиною, тому зазвичай застосовується генерація за вручну написаними фразами-шаблонами.

Викладення основного матеріалу дослідження

Загальний процес побудови моделі має лінійну структуру, яка поділена на три рівня обробки документу: **синтаксичний рівень**, який об'єднує у собі деякі типові задачі обробки тексту, такі як виділення слів і речень із вхідного тексту, визначення стем, зважування елементів тексту, автоматичне визначення частини мови, тощо; **семантичний рівень**, який реалізує у собі компонент латентно-семантичного аналізу і додаткові засоби інтелектуальної обробки даних, завдяки яким відбувається формування фінальної семантичної моделі вхідного тексту; **рівень виведення**, який відповідає за відображення і збереження отриманої семантичної моделі у базу знань. Його детальний опис наведено у роботі [1]. Результатом виконання процесу над неструктурованим науковим тестом є семантична структура, представлена сукупністю множин термінів T і сукупністю множин речень S , зв'язок між якими визначається матрицею семантичних ваг W :

$$\begin{aligned} T &= \{T_1\{t_1 \dots t_{w_{T1}}\} \dots T_n\{t_n \dots t_{w_{Tn}}\}\}, \\ S &= \{S_1\{s_1 \dots s_{l_1}\} \dots S_l\{s_l \dots s_{l_l}\}\}, \\ W &= \begin{bmatrix} \{w_{T1}, w_{S1}\}, & \{w_{T2}, w_{S1}\} & \dots & \{w_{Tn}, w_{S1}\} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \{w_{T1}, w_{Sm}\}, & \{w_{T2}, w_{Sm}\} & \dots & \{w_{Tn}, w_{Sm}\} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $t_1 \dots t_{w_{Tn}}$ – множина координат стем, що формують кластер-стему, $s_1 \dots s_{l_l}$ – множина координат речень, що формують кластер-речення, w_{Tn} – кількість точок у кластері-стемі, S_l – розмір кластера речення, w_S – вага зв'язку між кластером-стемою і кластером-реченням, n – кількість кластерів-стем, $m = n$ – кількість кластерів-речень.

Графічний результат роботи етапу виведення зображений на рис. 1. Результуюча семантична модель складеться із кластерів-стем (позначено на рисунку як WordCluster), до яких прив'язане значення кількості стем у кластері (зображене на рисунку у квадратних дужках), та кластерів-речень (позначено на рисунку як SentenceCluster), які пов'язані із кластерами-стемами семантичним відношенням, вага якого позначена у круглих дужках.

Для оцінки адекватності отриманої моделі система була перевірена на текстах, створених в результаті генерування на основі шаблонів синонімізації. Для цього був використаний сервіс [4], що дозволяє створювати тексти за обраною тематикою та розміром.

Особливістю згенерованого документу є задовільна для систем статичної обробки тексту частотна картина. Наприклад, розглянемо частотні портрети двох текстів однакового розміру, які наведені в таблиці 1. Ґрунтуючись на частотних портретах документів, за умови їх однакового розміру, можна зробити висновок, що обидва тексти мають тематичну спрямованість «космос» і перший текст присвячений темі галактичного радіовипромінювання, а другий – астероїдів,

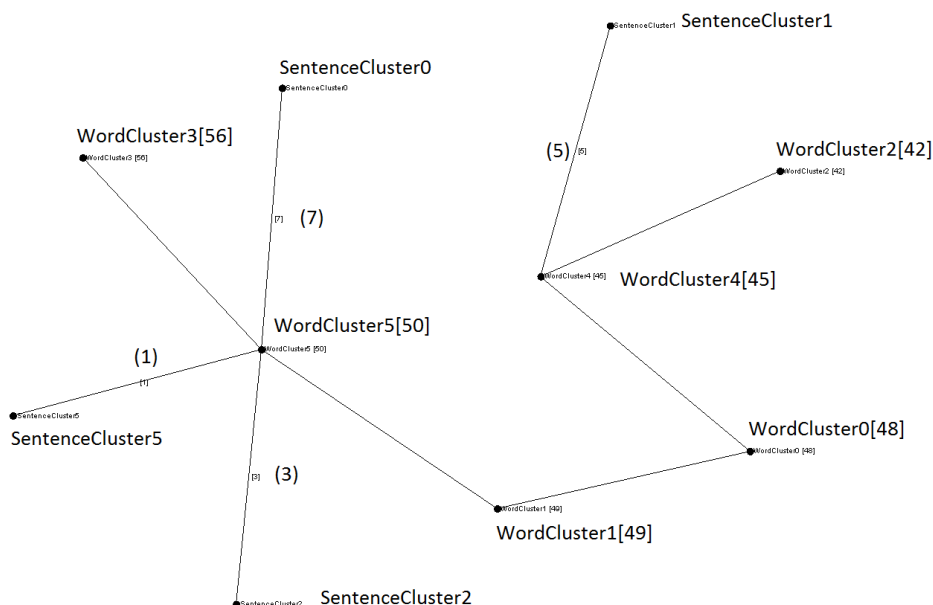


Рис. 1. Семантична модель для технічного тексту зі сильними семантичними зв'язками

однак це не зовсім так, оскільки перший текст є автоматично згенерованим текстом, а другий – семантично важливим знанням, що дійсно описує тему астероїдів. З цього витикає гіпотеза про перший критерій адекватності моделі, який можна сформулювати наступним чином: якщо модель орієнтується не тільки на синтаксичний і частотний, а й на семантичний рівень розуміння тексту, то у процесі роботи із згенерованим текстом, на відміну від семантично зв'язного тексту, повинні відбутися зміни кількісних характеристик семантичних властивостей створеної моделі, за умови однакової стилістичної спрямованості і близьких фізичних об'ємів обох текстів. Задля її перевірки було проведено ряд експериментів із згенерованим текстом і порівняння отриманих результатів із схожими семантично нормальними текстами.

Таблиця 1

Частотні портрети згенерованого тексту і знання

Документ1		Документ2	
Слово	Вага	Слово	Вага
Радіовипромінювання	88	астероїдів	92
галактичної	87	існують	23
джерела	83	планетні	22
об'єктів	53	поверхню	18
оптичне	44	земної	18
званих	42	зіткнення	17
зірки	42	залишалися	18

Роздивимось деякі приклади отриманих результатів. Результат обробки автоматично згенерованого документу наведено на рис. 2. Незважаючи на те, що не тільки обсяг автоматично згенерованого тексту співпадав з прикладом тексту із рис. 1, наведеним раніше, а і його технічна спрямованість, отримана семантична модель має значні яскраво виражені відмінності.

Перш за все, мова йде про кількість кластерів-стем, кластерів-речень, що мають зв'язки із кластерами-стемами, та вагу цих зв'язків – кількість «вільних» кластерів стем і їх загальна кількість значно перевищує аналогічні показники у еталонного тексту. Оскільки у нашій моделі,

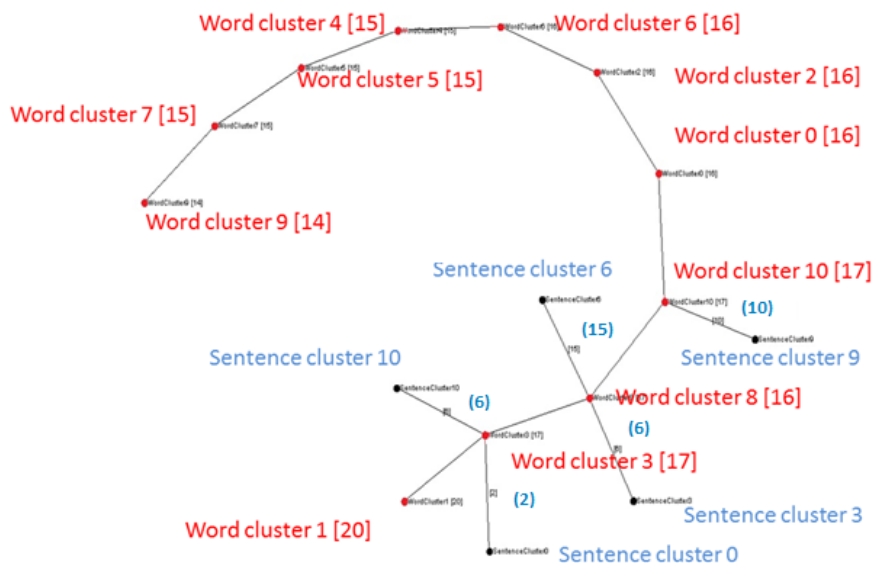


Рис. 2. Семантична модель для автоматично згенерованого технічного тексту зі слабкими семантичними зв'язками

саме ці данні і виражають кількісні характеристики семантичних властивостей тексту, то для оцінки роботи моделей на згенерованих текстах було виконано попарне порівняння числових значень семантичних моделей згенерованого тексту і знання щодо значення середнього коефіцієнта семантичної значущості моделі μ (2):

$$\mu(D) = \frac{\sum_{i=0}^N f_{\min}(D_i, D_{i+1})}{N},$$

$$f_{\min}(D_1, D_2) = \min \left\{ \frac{\sum w_{SD_1}}{N_{D_1}}, \frac{\sum w_{SD_2}}{N_{D_2}} \right\},$$

$$f_{\max}(D_1, D_2) = \max \left\{ \frac{\sum w_{SD_1}}{N_{D_1}}, \frac{\sum w_{SD_2}}{N_{D_2}} \right\},$$
(2)

де $\sum w_{SD}$ – вага всіх семантичних зв'язків в моделі знання D , N_D – кількість кластерів в моделі знання D , $f_{\min}(D_1, D_2), f_{\max}(D_1, D_2)$ – функції, які повертають мінімальне і максимальне значення відносин, N – кількість експериментів.

Дане значення характеризує розподіл семантичних міток документа (кластерів-стем) щодо семантичних зв'язків, і показує залежність цього значення для пар текстів в корпусі знань $D = \{d_1 \dots d_N\}$. Коефіцієнт семантичної значущості моделі був розрахований для D_g – корпусу автоматично створених документів, D_l – корпусу знань і D_{gl} – корпусу, в якому зіставляється згенерований текст і знання між собою. Дослідження показали, що зміни коефіцієнта семантичної значущості для корпусу згенерованого тексту і корпусу знань при порівнянні текстів однакових розмірів практично не відбувається: $\mu_g(D_g) = 0,911$ та $\mu_l(D_l) = 0,932$ відповідно. Однак, якщо порівнювати між собою знання і згенерований текст, очевидне значне падіння значення коефіцієнта до $\mu_{gl}(D_{gl}) = 0,335$. Це відбувається через те, що на відміну від згенерованого тексту, семантичні мітки знання мають значно більшу вагу і відповідно об'єднують більшу кількість семантично пов'язаних термінів, підвищуючи таким чином семантичну значущість моделі. Через значно більшу кількість кластерів-стем в моделях згенерованого тексту, підтверджується головна ідея використання моделі в задачах автоматичної обробки знань в системах генерації відповідей – терміни не об'єднуються в семантичні мітки, оскільки не

існує ніякого семантичного зв'язку знань в початковому тексті, що наочно показує адекватність розробленої моделі.

Окремою і важливою перевіркою адекватності алгоритму побудови семантичної моделі тексту є оцінка сенсової місткості семантичних міток документа. Сформульована гіпотеза має на увазі, що утворені семантичні мітки документа мають найбільшу кількість перетинів із семантичними контурами тоді, коли вони містять найбільшу кількість семантично значимих стем у своєму складі. Якщо це так, то отримана модель спроможна автоматично скласти семантичні тезауруси понять, встановлюючи відповідності між наборами речень та семантичною міткою документа, реалізуючи при цьому схему розуміння абстрактного поняття завдяки набору значимих слів. Розглянемо прилад обробки технічного тексту, тематика якого стосується теми космосу, а саме – космічного реліктового випромінювання (рис. 3).

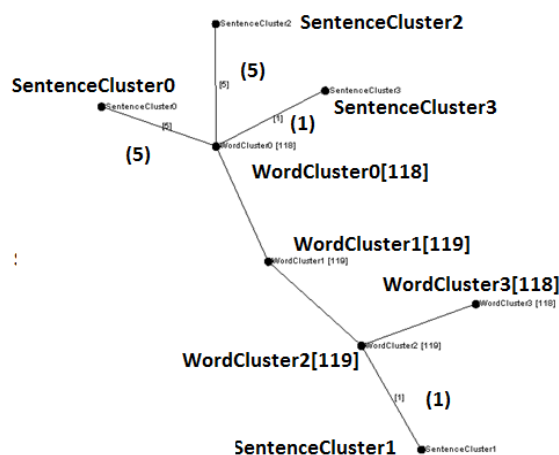


Рис. 3. Семантична модель тексту «Реліктове випромінювання»

На рис. 3 зображена семантична модель тексту, на основі якої видно, що кластер-стема із номером «0» має найбільшу сумарну вагу зв'язків із семантичними контурами, ніж інші, а кластер-стема із номером «3» не має перетинів із семантичними контурами стем. Тоді, відповідно до гіпотези що перевіряється, нульовий кластер має бути найінформативнішим і однозначно вказувати своїм змістом на тематику тексту, а третій кластер – мати у своєму складі неінформативні і семантично неоднозначні стем. Дійсно, порівнявши кластери між собою, можна побачити значущу різницю – нульовий кластер містить стем (всесвіт, реліктове, гравітаційних, супутникових, випромінювання, космічне та ін.), що не тільки пов'язані із головною тематикою тексту, а і семантично пов'язані між собою галузевою спрямованістю. З іншого боку, кластер, що не потрапив у семантичну мережу, не представляє ніякої сенсової цінності, на весь кластер присутня лише одна стема, що має відношення до теми космосу (телескоп), інші – являють собою семантично узагальнені слова, що не визначають ніякої предметної галузі.

Описана оцінка сенсової місткості семантичних міток документа не обмежується кількома тестами, і була проведена для окремої тестової бази знань, оскільки саме вона вказує на залежність структури семантичної мережі і семантичних властивостей документа. Для цього було перевірено 65 семантичних моделей, для яких було розраховано коефіцієнт середньої семантичної ємності ϵ (3) по кожній з тем – економіка, філософія, інформаційні технології і астрономія:

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=0}^N \frac{N_H}{N_L}}{N}, \quad (3)$$

де N_H – кількість термінів, семантично пов'язаних з тематикою знання в кластері-стемі з найбільшою загальною вагою зв'язків з кластерами-реченнями (сильні кластери), N_L – кількість термінів,

семантично пов'язаних з тематикою знання в кластері-стемі з нульовою загальною вагою зв'язків з кластерами-реченнями (слабкі кластери), N – загальна кількість проведених тестів для заданої теми.

Даний коефіцієнт показує, у скільки разів щільність семантично важливих термінів в сильних кластерах перевищує щільність семантично важливих термінів в слабких кластерах.

Отримані результати розрахунку сенсової місткості для кожного тематичного набору текстів показують, що у проведених тестах кількість семантично значних термінів у семантично сильних кластерах значно перевищує кількість термінів у семантично слабких кластерах, незалежно від кількості, розміру та тематичної спрямованості документів: для тематики «економіка» (15 документів) кількість термінів у сильних кластерах у середньому у 2,98 рази більша ніж у слабких, для тематики філософія (21 документ) у 3,37 рази, для тематики «астрономія» (24 документа) у 3,47 рази, для тематики «інформаційні технології» (5 документів) у 4,44 рази. При проведенні досліджень не враховувалась вага стем або їх будь-яке синтаксичне співвідношення із текстом – пов'язані терміни оцінювалися лише з точки зору належності до тематики документу, тому отримані результати вказують на цілком адекватне формування семантичних міток документу – кількість семантично значимих термінів у кластері-стемі прямо пропорційна до кількості та ваги пов'язаних із ним семантичних контурів речень у побудованих моделях документів, що доводить залежність структури семантичної мережі саме від семантичної складової тексту, і доводить її адекватність.

Висновки

Для оцінки отриманих за допомогою семантичної моделі результатів була сформульована та виконана поетапна перевірка семантичних властивостей розробленої моделі для визначення залежності саме від семантичних, а не від частотних характеристик документу. Виконаний ряд порівняльних тестів довів, що отримана модель є адекватною і може застосовуватися задля безсловникового універсального підходу до кількісного опису семантичних властивостей тексту. Встановлено, що через значно більшу кількість кластерів-стем в моделях хаотично згенерованого тексту підтверджується головна гіпотеза використання семантичної моделі в задачах автоматичної обробки знань в системах генерації відповідей – терміни не об'єднуються в семантичні мітки, оскільки не існує ніякого семантичного зв'язку знань в початковому тексті, що наочно показує адекватність розробленої моделі. Було встановлено, що кількість семантично значимих термінів у кластері-стемі прямо пропорційна до кількості та ваги пов'язаних із ним семантичних контурів речень у побудованих моделях документів, що доводить залежність структури семантичної мережі саме від семантичної складової тексту [5]. Завдяки цьому стає можливим подолати обмеження тлумачно-комбінаторного словника, що накладав строгі рамки використання лінгвістичних знань на створення прикладних програмних моделей, і застосувати парадигми м'якого розуміння Леонтьєвої для автоматичної генерації текстів, автоматичної класифікації документів і інших завдань автоматичної обробки текстів [5].

Список використаної літератури

1. Ковилін Є.Р. Модель генерації відповідей в пошукових системах на основі неструктурованої бази знань : дис ... канд. техн. наук : 01.05.02. Національна металургійна академія України. Дніпро, 2020. 233 с.
2. Усталов Д.А. Моделі, методи та алгоритми побудови семантичної мережі слів для задач обробки природної мови : дис ... канд. фіз.-мат. наук : 05.13.17. ФГБУМ. Челябінськ, 2017. 129 с.
3. Болдас М.В., Соколова Є.Г. Генерація текстів на природній мові – теорії, методи, технології. *НТІ. Сер. 2. Інформаційні процеси і системи*, 2006. С.1-15.
4. Генератор тексту. URL: <https://online-generators.ru/text>

5. Volkovsky O.S., Kovylin Y. R. Computer system of intellectual semantic search with the text generation using. *Bulletin of the Kherson National University*. 2018. №3 (66). P. 238-245.

References

1. Kovylin, Y.R. (2020). Model' heneratsii vidpovidej v poshukovykh systemakh na osnovi nestrukturovanoj bazy znan'. Diss. kand. tekhn. nauk [Model of answers generating in the search engines based on an unstructured knowledge base] Dnipro.
2. Ustalov, D.A. (2017). Modeli, metody ta alhorytmy pobudovy semantychnoi merezhi sliv dlia zadach obrobky pryrodnoi movy. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Models, methods and algorithms for constructing a semantic network of words for natural language processing tasks] Chelyabinsk.
3. Boldas, M.V., & Sokolova, Ye.H. (2006). Heneratsiia tekstiv na pryrodnij movi – teorii, metody, tekhnolohii [Generation of texts in natural language - theories, methods, technologies]. *NTI "Informatsijni protsesy i systemy"* [NTI Information processes and systems], **2**, 1-15.
4. Henerator tekstu. URL: Available at: <https://online-generators.ru/text> (accessed 15 September 2022).
5. Volkovsky, O.S., & Kovylin, Y. R. (2018). Computer system of intellectual semantic search with the text generation using. *Bulletin of the Kherson National University*. **3** (66), 238-245.

Ковилін Єгор Романович – к.т.н., старший викладач кафедри інформаційних технологій Університету імені Альфреда Нобеля. e-mail: kovylin.yehor@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2734-4095.

МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЦЕНТРУ EL2 В АРСЕНІДІ ГАЛІЮ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ДИФУЗІЇ ДОМІШОК

Вивчено природу впливу відпалу та дифузії домішок атомів кадмію і селену на зміну квантової ефективності випромінювання, що індукується центрами EL2 в монокристалах арсеніду галію. Використано порівняльну методику високотемпературної дифузії домішок в умовах вакууму і атмосфери миш'яку. За одержаними результатами здійснено моделювання структурних, випромінювальних та інших фізичних властивостей центрів EL2 в монокристалах арсеніду галію. Встановлено, що характер і ступінь зміни квантової ефективності випромінювання через ці центри визначаються вакансійним складом кристалів і обумовлено вірогідністю формування комплексів EL2-домішка.

Для досліджень були використані кристали напівізолюючого нелегованого GaAs n-типу провідності, що вирошені методом Чохральського з орієнтацією (100) і питомим опором $\rho = 7 \times 10^7 - 2 \times 10^8 \text{ Ом} \times \text{см}$. Концентрація центрів EL2, що є глибокими донорами, в них становила $N = (1.2 - 1.8) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Уведення домішки селену або кадмію здійснювалося в зразки товщиною $\sim 2 \text{ мм}$ при температурі 900°C протягом 4-8 годин з подальшим загартовуванням. Також проводився контрольний відпал зразків без введення домішок. Він відбувався у вакуумі та при надмірному тиску парів миш'яку в тих же умовах, що і при дифузії селену та кадмію. Вивчення та моделювання механізмів формування спектрів фотолумінесценції, селективного збудження люмінесценції та фотогасіння випромінювання через центри EL2 проводилося за стандартними методиками.

Зроблений аналіз отриманих даних з позиції моделювання структури центрів EL2. Встановлено, що в кристалах з дефіцитом галію поблизу антиструктурних дефектів As_{Ga} (атоми миш'яку на позиції галію) знаходяться вакансії Ga. У той самий час збільшення концентрації вакансій миш'яку визначає саме їх локалізацію поблизу антиструктурних дефектів As_{Ga} . Отже найбільш вірогідним вирішенням питання стосовно складу центру EL2 є те, що ймовірність утворення комплексів певного складу визначається концентрацією тих чи інших точкових дефектів в кристалі. Зміна концентрації точкових дефектів обумовлює зміну структури комплексу AsGa-точковий дефект на користь домінуючого дефекту або відсутність точкового дефекту поблизу As_{Ga} .

Ключові слова: арсенід галію, моделювання, антиструктурний дефект, точковий дефект, домішки, дифузія, фізичні властивості.

M. B. LITVINOVA, O. D. SHTANKO

Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding

SIMULATION OF THE EL2 CENTER PHYSICAL PROPERTIES IN GALLIUM ARSENIDE ACCORDING TO THE RESULTS OF THE IMPURITIES HIGH-TEMPERATURE DIFFUSION

The nature of the annealing and diffusion effects of impurities of cadmium and selenium atoms on the change of the radiation induced by EL2 centers quantum efficiency in gallium arsenide single crystals was studied. A comparative technique of high-temperature diffusion of impurities in vacuum and arsenic atmosphere was used. According to the obtained results, modeling of structural, radiative and other physical properties of EL2 centers in single crystals of gallium arsenide was carried out. It was established that the nature and degree of change in the quantum efficiency of radiation through these centers is determined by the vacancy composition of the crystals and is determined by the probability of the formation of EL2-impurity complexes.

Crystals of semiinsulating unalloyed n-type GaAs conductivity grown by the Czochralsky method with (100) orientation and resistivity $\rho = 7 \times 10^7 - 2 \times 10^8 \text{ Ом} \times \text{cm}$ were used for the research. The concentration of EL2 centers, which are deep donors, in them was $N = (1.2 - 1.8) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. The impurity of selenium or cadmium was introduced into samples with a thickness of $\sim 2 \text{ mm}$ at a temperature of 900°C for 4-8 hours followed by quenching. A control annealing of samples without inclusion of impurities was also carried out. It took place in a vacuum and under excessive pressure of arsenic vapors under the same conditions as during the diffusion of selenium and cadmium. The study and modeling of the mechanisms of formation of photoluminescence spectra, selective excitation of luminescence and photoquenching of radiation through EL2 centers was carried out according to standard methods.

An analysis of the obtained data was made from the point of view of modeling the structure of EL2 centers. It has been established that Ga vacancies are found in gallium-deficient crystals near As_{Ga} antistructural defects (arsenic

atoms at gallium positions). At the same time, an increase in the concentration of arsenic vacancies determines precisely their localization near As_{Ga} antistructural defects. Therefore, the most likely solution to the question regarding the composition of the EL2 center is that the probability of formation of complexes of a certain composition is determined by the concentration of certain point defects in the crystal. A change in the concentration of point defects causes a change in the structure of the AsGa-point defect complex in favor of the dominant defect or the absence of a point defect near As_{Ga} .

Key words: gallium arsenide, modeling, antistructural defect, point defect, impurities, diffusion, physical properties.

Постановка проблеми

Нелегований арсенід галію є одним із напівпровідникових сполучень, що широко використовуються для створення елементів високочастотної інтегральної мікроелектроніки і детекторів іонізуючого випромінювання. Антиструктурні дефекти EL2 відіграють основну роль у визначенні напівізолюючих властивостей монокристалів нелегованого арсеніду галію. Дані про структурні та рекомбінаційні характеристики цих центрів сприяють отриманню якісних кристалів із заданими властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Незважаючи на тривале вивчення центру EL2, відкритого ще 1963 р. та ідентифікованого як глибокий донор у 1976 р., досі не існує єдиної думки про його структуру [1-6]. Починаючи з 1982 основою різних моделей цього центру є антиструктурний дефект – миш'як на позиції галію As_{Ga} [7-8]. Однак до теперішнього часу одні автори вважають, що EL2 – це ізольовані дефекти As_{Ga} [1,2], інші вважають їх комплексами As_{Ga} з міжвузловими атомами миш'яку As_i ($As_{Ga}-As_i$) [3], або з вакансіями галію V_{Ga} ($As_{Ga}-V_{Ga}$) [4] або з подвійним вакансійним складом ($As_{Ga}-V_{As}V_{Ga}$) [5]. Існують також дані, що дозволяють говорити про центри EL2 як сім'ю дефектів $As_{Ga}+X$ [6], які в процесі термообробки можуть змінювати свій склад по елементу X.

Рекомбінаційні процеси за участю центрів EL2 індукують появу в спектрах низькотемпературної ($T=77$ K) фотолюмінесценції смуги випромінювання з енергією максимуму $h\nu_m \approx 0.65$ eV, яка є суперпозицією смуг з $h\nu_m \approx 0.63$ і $h\nu_m \approx 0.68$ eV (рис. 1 (a)) [1]. Перша з них викликана випромінювальним захопленням вільних електронів е зарядженими дефектами $EL2^+$ (перехід $e \rightarrow EL2^+$), друга – вільних дірок h нейтральними дефектами $EL2^0$ (перехід $h \rightarrow EL2^0$) (вставка на рис. 1(a)). На ефективність рекомбінації через центри, що розглядаються, впливають ряд факторів. Насамперед, це процеси самодифузії в GaAs. Дифузія від поверхні кристалів вакансій миш'яку під час високотемпературної термообробки (ТО) матеріалу в умовах вакууму викликає зменшення концентрації центрів EL2 (N_{EL2}) внаслідок реакції



та зниження інтенсивності випромінювання з $h\nu_m = 0.65$ eV (I_{0.65}). Навпаки, формування нових центрів EL2 при ТО за умов надлишкового тиску парів As ($\rho_{As} > 9.8 \cdot 10^4$ Па) веде до збільшення I_{0.65} [2].

Також відомо, що зниження інтенсивності випромінювання з $h\nu_m \approx 0.65$ eV має місце під час уведення до кристалів GaAs атомів міді, що зумовлено пасивацією дефектів EL2 у результаті формування комплексів EL2-Cu [3]. Однак вплив інших донорних і акцепторних домішок на ефективність рекомбінації через центри, що розглядаються, є маловідомим.

Мета роботи

Метою роботи є за результатами порівняльної дифузії домішок селену і кадмію в умовах вакууму та атмосфери миш'яку в монокристали арсеніду галію провести моделювання фізичних властивостей центрів EL2.

Викладення основного матеріалу дослідження

Нами були використані кристали напівізолюючого нелегованого (НН) GaAs n-типу провідності, що вирощені методом Чохральського з орієнтацією (100) і питомим опором $\rho = 7 \times 10^7 \text{--} 2 \times 10^8$

Ом×см. Концентрація центрів EL2 була знайдена методом оптичного поглинання квантів світла з енергією $h\nu=1.04$ eV [7] і становила $N=(1.2-1.8)\times 10^{16}$ см⁻³. Вихідна різниця інтенсивностей смуг ФЛ з $h\nu_m \approx 0.63$ і $h\nu_m \approx 0.68$ eV при 77 K не перевищувала 6%. Оскільки в спектральній ділянці, що вивчається, також можуть бути смуги, що індукуються атомами кисню [4, 5] ($h\nu_m \approx 0.63$ eV), нами також було проведено дослідження спектрів селективного збудження ФЛ. Результати фотогасіння випромінювальної рекомбінації через дефекти EL2 до і після введення домішки в зразки дозволили пов'язати всі виявлені в цій роботі ефекти з центрами EL2.

Уведення домішки (селену або кадмію) здійснювалося в зразки товщиною ~2 мм при температурі 900° C протягом 4-8 годин з подальшим загартуванням. Надходження домішки відбувалося з термічно напиленого шару Cd (Se) товщиною 1 мкм, що забезпечило умови дифузії з постійного джерела. Поверхневий шар Ga₂Se₃, що утворився після дифузії Se, видаляли в кислотному травнику.

Дифузія домішок проводилася у вакуумі та при надмірному тиску парів миш'яку. При термообробці зразки поміщалися в кварцові ампули з робочим об'ємом ~4 см³, які були попередньо знежирені і протруєні в царській горілці, що знижувало неконтрольоване забруднення кристалів міддю. Ампули відкачувалися до тиску 10^{-3} Па. Для створення надлишкового тиску парів As у них містилася добавка миш'яку масою 20 мг. Оскільки значення коефіцієнта дифузії для домішок при температурі 900°С ($D_{Cd} \approx 3 \cdot 10^{-16}$ см²·с⁻¹, $D_{Se} \approx 7 \cdot 10^{-17}$ см²·с⁻¹ [6]) є істотно нижчим, ніж для вакансій миш'яку ($D_{VAs} \approx 1 \cdot 10^{-15}$ см²·с⁻¹), дифузія у вакуумі забезпечувала надходження домішки в кристали з дефіцитом миш'яку, а при надмірному тиску парів As – в кристали з його надлишком.

Також проводився контрольний відпал зразків без напилення домішки. Він відбувався у вакуумі та при надмірному тиску парів миш'яку в тих же умовах, що і при дифузії селену та кадмію. Концентрацію носіїв заряду з $n > 10^{16}$ см⁻³ визначали за півшириною крайової смуги ФЛ при 300 K [1].

Вивчення спектрів ФЛ та селективного збудження люмінесценції (СЗЛ) проводилося за стандартними методиками [8]. Джерелом збудження ФЛ був гелій-неоновий лазер із довжиною хвилі випромінювання 0.63 мкм. Для отримання спектрів СЗЛ використовувалася лампа КГМ потужністю 60 Вт. Селективне виділення смуг збудження напівшириною $w_{ex} \leq 0.8$ меВ потужністю 4-6 мВт в області $h\nu_{ex}=1.0-1.52$ eV здійснювалося монохроматором МДР-2. Інтенсивність випромінювання (I_m) при 77 K в області значень $h\nu_m > 1$ eV реєструвалася за допомогою ФЕУ-68, а при $h\nu_m < 1$ eV – за допомогою германієвого фотодіода ФД-9Г, що охолоджувався. Далі відбувався автоматичний перерахунок значень відносної інтенсивності випромінювання $I_{arb} = I_m / I_{ex}$ (I_{ex} – відповідна інтенсивність збудження ФЛ).

При вивченні фотогасіння випромінювання через центри EL2 зразок спочатку нагрівався до $T=(155\pm 5)$ K і витримувався при такій температурі 10-11 хв. Потім він різко охолоджувався до $T=77$ K. Вимірювання інтенсивності I_m відбувалося після повної стабілізації її величини. Процедура повторювалася перед визначенням кожного нового значення $I_m(h\nu_{ex})$, крок вимірювань складав $\Delta h\nu_{ex} = 2$ меВ.

Модель випромінювання через центри EL2

а. НІН GaAs (*n*-тип провідності). При власному збудженні ФЛ у стаціонарному випадку інтенсивності смуг люмінесценції, що обумовлені дефектами EL2⁺ ($I_{0.63}$) і EL2⁰ ($I_{0.68}$) (рис. 1(a)) є однаковими [1, 3]:

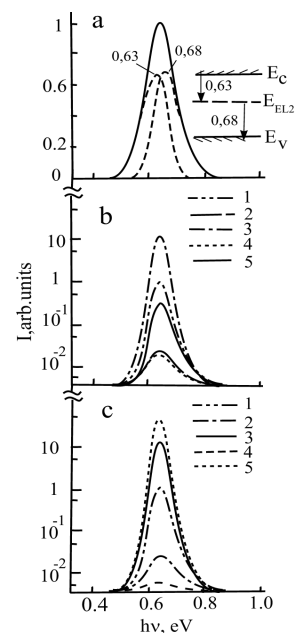
$$I_{0.68} = I_{0.63} \quad (2)$$

Тоді у високоомному нелегованому матеріалі:

$$I_{0.68} = c_p^0 \cdot N_{EL2^0} \cdot \delta p, \quad (3)$$

$$I_{0.63} = cn^+ \cdot N_{EL2^+} \cdot \delta n = cn^+ \cdot (N_{EL2} - N_{EL2^0}) \delta n, \quad (4)$$

Рис. 1. Смуга випромінювання з $h\nu_m \approx 0.65$ eV при $T=77$ К в спектрі ФЛ кристалів арсеніду галію:
 а) – розклад на складові з максимумами випромінювання на 0.63 і 0.68 eV.
 На вставці показано відповідні оптичні переходи;
 б) – зміна $I_{0.65}$ в результаті введення кадмію ($N_{Cd}=8 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$);
 с) – зміна $I_{0.65}$ в результаті введення селену ($N_{Se}=3 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$).
 Криві: 1 – вихідні НІН кристали;
 2 – ТО в вакуумі без домішки;
 3 – ТО в атмосфері As без домішки;
 4 – домішку введено в вакуумі;
 5 – домішку введено в атмосфері As



де δn и δp – нерівноважні концентрації електронів і дірок ($\delta n, \delta p \gg n_0, p_0$; n_0, p_0 – їх рівноважні концентрації); c_p^+ и c_p^0 – коефіцієнти випромінювального захвату електронів дефектами $EL2^+$ и дірок дефектами $EL2^0$, відповідно; N_{EL2^+} и N_{EL2^0} – концентрації цих дефектів; N_{EL2} – їх сумарна концентрація. З виразів (2), (3) і (4) випливає, що

$$c_p^0 \cdot N_{EL2^0} \cdot \delta p = c_n^+ \cdot (N_{EL2} - N_{EL2^0}) \cdot \delta n, \quad (5)$$

$$N_{EL2^0} = (c_n^+ \delta N_{EL2} \cdot \delta n) / (c_p^0 \delta p + c_n^+ \delta n). \quad (6)$$

Оскільки $c_p^0 \ll c_n^+$, то $N_{EL2^0} \approx N_{EL2}$ і, як наслідок,

$$I_{0.65} = c_p^0 \cdot N_{EL2} \cdot \delta p. \quad (7)$$

б. *GaAs(Cd)*. В низькоомному матеріалі з р-типом провідності ($p_0 \gg \delta n, \delta p$) в рівновазі всі центри заповнені дірками і рівноважна концентрація $N_{EL2^0} = 0$, а нерівноважна – $\delta N_{EL2^0} \ll N_{EL2}$. Тому в умовах лінійної рекомбінації носіїв заряду інтенсивність випромінювання через центри $EL2$ складає:

$$I_{0.65} = c_n^+ \cdot (N_{EL2} - \delta N_{EL2^0}) \delta n \approx c_n^+ \cdot N_{EL2} \cdot \delta n. \quad (8)$$

в. *GaAs(Se)*. В низькоомному матеріалі n-типу провідності ($n_0 \gg \delta n, \delta p$) всі центри заповнені електронами, рівноважна концентрація $N_{EL2^+} = 0$ і $N_{EL2^0} = N_{EL2}$. Тоді із (2) випливає, що

$$c_n^+ \cdot \delta N_{EL2^+} \cdot \delta n = c_p^0 \cdot (N_{EL2^0} + \delta N_{EL2^0}) \cdot \delta p. \quad (9)$$

Оскільки $N_{EL2^0} \gg N_{EL2^+}$, то в умовах лінійної рекомбінації носіїв заряду:

$$I_{0.65} = c_p^0 \cdot N_{EL2} \cdot \delta p. \quad (10)$$

Результати порівняльної дифузії домішок

Дифузія кадмію. Після дифузії атомів кадмію поверхня кристалів характеризувалася р-типом провідності. Легування в умовах вакууму викликало зниження $I_{0.65}$ тією ж мірою, що й без домішки (рис.1(b), кр.2, 4). При надмірному тиску пари As дифузія Cd призводила до зменшення інтенсивності випромінювання через центри $EL2$, а відпал контрольних зразків без домішки – до його збільшення. Значення $I_{0.65}$ на поверхні легованих кристалів були на 2-3 порядки нижче значень, що характерні для відпалу без домішки (рис. 1(b), кр.3, 5).

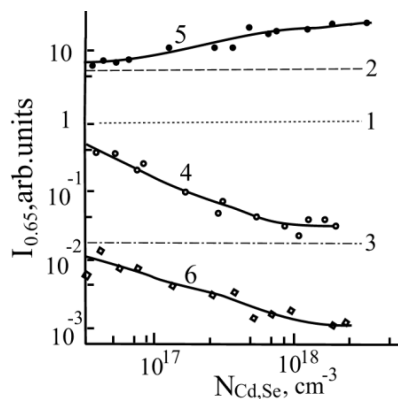


Рис. 2. Зміна $I_{0.65}$ залежно від концентрації домішки:
 4 – Cd; 5,6 –Se; 4, 5 – атмосфера As; 6 – вакуум.
 Розривні лінії графіка відповідають $I_{0.65}$:
 1- у вихідному кристалі;
 2 – після ТО в атмосфері As без домішки;
 3 – після ТО в вакуумі без домішки

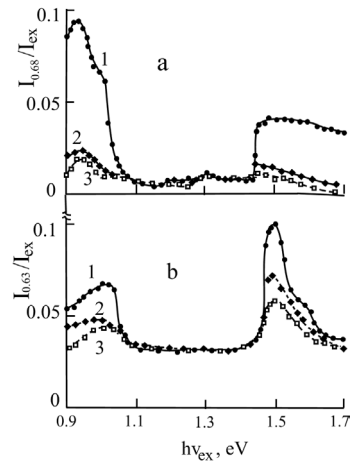


Рис. 3 Спектр СЗЛ при $T=77$ К:
 а) – полоси з $h\nu_m=0.68$ еВ;
 б) – полоси з $h\nu_m=0.63$ еВ.
 1- у вихідному кристалі;
 2 – після дифузії кадмію в атмосфері As;
 3 – після дифузії селену в атмосфері As

Залежність $I_{0.65}$ від концентрації домішки показала (рис. 2, кр.4), що відбувається зниження $I_{0.65}(N_{Cd})$ зі збільшенням вмісту атомів кадмію в кристалі. Оскільки на поверхні легованих кристалів спостерігається лінійна рекомбінація носіїв заряду, а час їхнього життя ($\tau_n=(2-3)\cdot 10^{-10}$ с) мало змінювався порівняно з НІН GaAs (це свідчить про відсутність нових, більш ефективних каналів випромінювальної та безвипромінювальної рекомбінації), то із співвідношень (10) і (11) впливає, що $I_{0.65}\sim N_{EL2}$. Тому зниження $I_{0.65}$ після ТО в атмосфері As, як і при легуванні Cu [1], викликано зниженням концентрації ізольованих центрів EL2 внаслідок утворення комплексів EL2-Cd.

Дійсно, оскільки атоми Cd у GaAs займають вакансії Ga, то до складу комплексів вони можуть входити як EL2-Cd_{Ga}. Як зазначалося, значення коефіцієнта дифузії для Cd істотно нижче, ніж для вакансій миш'яку. Тому можна вважати, що кадмій дифундує в область кристала де при надмірному тиску парів As знижується $[V_{As}]$ і, відповідно до виразу [2]:

$$[V_{As}]\cdot[V_{Ga}] = k\cdot p_{As}^{1/2} \quad (11)$$

($[V_{As}]$ і $[V_{Ga}]$ – концентрації вакансій As і Ga), зростає $[V_{Ga}]$ (дефіцит галію) [6]. Збільшення числа V_{Ga} поблизу антиструктурних дефектів As_{Ga} сприяє утворенню комплексів EL2-Cd_{Ga}. У той же час дифузія у вакуумі відбувається в поверхневу область кристала з високою $[V_{As}]$ і, відповідно, низькою $[V_{Ga}]$. Це визначає малу ймовірність формування комплексів As_{Ga}-Cd_{Ga} і введення Cd не впливає на $I_{0.65}$.

Дифузія селену. Після введення атомів селену поверхня кристалів характеризувалася n-типом провідності. Дифузія в умовах вакууму призводила до зниження $I_{0.65}$ більшою мірою, ніж відпал зразків без домішки (рис. 1(с), кр.2, 4). У той самий час дифузія Se у атмосфері As викликала збільшення $I_{0.65}$, щодо значень бездомішкового відпалу (рис. 1(с), кр.3, 5). Обидва ефекти посилювалися зі зростанням концентрації домішки (N_{Se}) (рис. 2, кр.5, 6).

В умовах лінійної рекомбінації носіїв заряду, коли час життя τ_n в області легування Se відповідав значенням у НІН GaAs, з (8) і (11) впливає, що $I_{0.65}\sim N_{EL2}$ і зміна $I_{0.65}$ визначається зміною N_{EL2} .

Збільшення інтенсивності випромінювання через центри EL2 після дифузії Se в атмосфері миш'яку, найімовірніше, викликано частковим витісненням атомів As домішкою, що вбудовується в підгратку миш'яку [6]. При цьому витіснені атоми можуть займати вакансії галію, утворюючи антиструктурні дефекти (як зазначалося, $[V_{Ga}]$ збільшується біля поверхні кристалів при ТО в атмосфері As).

Зменшення $I_{0.65}$ внаслідок дифузії селену при ТО у вакуумі можна, як у випадку з кадмієм та міддю, пов'язати зі зниженням ефективності випромінювання через дефекти EL2 у результаті утворення комплексів EL2-Se. Справді, селен дифундує вузлами підгратки As [7] і може утворювати комплекси EL2-Se_{As}. При ТО у вакуумі, в результаті вильоту миш'яку, домішка потрапляє в область кристала з високою $[V_{As}]$ (дефіцитом As) і комплексоутворення обумовлено тим, що вакансії As присутні поблизу антиструктурних дефектів As_{Ga}. Останнє можливе, якщо ймовірність рекомбінації між As_{Ga} і V_{As} (вираз (1)) менше одиниці, тобто існує потенційний бар'єр для такої рекомбінації.

Фотогасіння випромінювання через центри EL2. Певний внесок у випромінювання з $h\nu_m \approx 0.63$ еВ, поруч із дефектами EL2, можуть вносити атоми кисню. Для з'ясування ступеня впливу цієї домішки (або будь-яких інших дефектів, що зумовлюють випромінювання з $h\nu_m \approx 0.63-0.68$ еВ [8]) на отримані в цій роботі результати було досліджено спектри селективного збудження смуг люмінесценції (СЗЛ) з $h\nu_m = 0.63$ ($I_{arb.0.63}$) і $h\nu_m = 0.68$ еВ ($I_{arb.0.68}$) у кількох контрольних кристалах GaAs до і після введення домішки в них. На спектрі СЗЛ НІН GaAs при $T=77$ К (рис. 3 а, б, кр. 1) видно, що у області $h\nu_{ex} \approx 1.102-1.458$ еВ має місце практично повне гасіння $I_{arb.0.68}$ і неповне гасіння $I_{arb.0.63}$. Після введення атомів Se або Cd з максимальною для цієї роботи концентрацією NSe (NCd) величини $I_{arb.0.68}$ та $I_{arb.0.63}$ (криві 2, 3 на рис. 3) в області фотогасіння не відрізнялися від відповідних значень у вихідних кристалах.

Відомо, що ефект гасіння випромінювання з $h\nu_m = 0.63$ і $h\nu_m = 0.68$ еВ при $h\nu_{ex} \approx 1.1-1.45$ еВ визначається переходом дефектів EL2 до оптично неактивного метастабільного стану [1]. Залишкове (після фотогасіння) випромінювання з $h\nu_m = 0.63$ еВ, найімовірніше, визначається атомами кисню [5] (ефект фотогасіння киснево-обумовленої смуги $h\nu_m = 0.63$ еВ дуже малий порівняно з такою ж смугою дефекту EL2). Існування фотогасіння і той факт, що введення як кадмію, так і селену не змінює величини залишкової інтенсивності $I_{arb.0.63}$ і $I_{arb.0.68}$. Це свідчить про те, що зміни $I_{0.65}$ в домішковій дифузійній зоні обумовлені дефектами EL2.

Висновки

За результатами моделювання фізичних властивостей центрів EL2 на основі порівняльної методики дифузії домішок в умовах вакууму та атмосфери миш'яку в монокристали арсеніду галію встановлено наступне.

1. Мідь є не єдиною домішкою, що викликає зміну квантової ефективності випромінювання через дефекти EL2 в кристалах GaAs. Введення акцепторної домішки кадмію призводить до її зниження в кристалах з дефіцитом галію і не змінює її величини в кристалах з дефіцитом миш'яку. Ефект викликаний зниженням концентрації ізолюваних центрів EL2 внаслідок утворення комплексів EL2-Cd_{Ga}.

2. Уведення донорної домішки селену збільшує квантовий вихід випромінювання через дефекти EL2 у кристалах з дефіцитом галію і знижує його в кристалах з дефіцитом миш'яку. Перший ефект, найімовірніше, обумовлений збільшенням концентрації центрів EL2 в результаті витіснення домішкою атомів As з підгратки миш'яку; другий – утворенням комплексів EL2-Se_{As}.

3. Можливим вирішенням питання про склад комплексів AsGa-точковий дефект є наступним: зміна концентрації ТД (вакансій та міжвузельних атомів) у кристалі зумовлює відповідну зміну в структурі комплексів на користь домінуючого дефекту або відсутність ТД поблизу As_{Ga}.

Список використаної літератури

1. Kovalenko V. F., Shutov S. V., Baganov Ye. A., Smykalo M. M. Near band-edge luminescence of semi-insulating undoped gallium arsenide at high levels of excitation *Journal of Luminescence*. 2009. Vol. 129, Iss. 9. P. 1029-1031. DOI: 10.1016/j.jlumin.2009.04.017
2. Zhukov N., Kabanov V., Mihaylov A., Mosiyash D. et al. Peculiarities of the Properties of III-V Semiconductors in a Multigrain Structure. *Semiconductors*. 2018. Vol. 52, Iss. 1. P. 78-83. DOI: 10.1134/S1063782618010256.
3. Gabibov F. S., Zobov E. M., Zobov M. E. The Effect of Ultrasonic Treatment on the Energy Spectrum of Electron Traps in n-GaAs Single Crystals. *Technical Physics Letters*. 2015. Vol. 41, Iss. 4. P. 362-365. DOI:10.1134/S1063785015040239

4. Shtan'ko A. D., Litvinova M. B., Kurak V. V. Decrease of exciton radiation intensity in compensated gallium arsenide single crystals under influence of low electric field. *Functional Materials*. 2010. Vol. 17, N 1. P. 46–51.
5. Shishkin M. I., Zhukov N. D., Kryl'skiy D. V. On the Synthesis and Photoluminescence and Cathodoluminescence Properties of CdSe, CdTe, PbS, InSb, and GaAs Colloidal Quantum Dots. *Semiconductors*. 2019. Vol. 53, Iss. 8. P. 1082-1087.
6. Badea A., Dragan F., Fara L., Sterian P. Quantum mechanical effects analysis of nanostructured solar cell models. *Renew Energy and Environmental Sustainability*. 2016. Vol. 1 (3). P. 1–5. DOI:10.1051/rees/2016003
7. Litvinova M. B., Hertcova N. Y., Seliverstova S. R. The optical measurement technique of the definition of the GaAs structure deflection degree from stexiometry. *Proceedings of CAOL'2003. 1st International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*. 16-20 Sept., 2003, Alushta, Crimea, Ukraine. Vol. 2. P. 278.
8. Litvinova M. B., Shtan'ko A. D. Influence of structural defects on the mechanical stress in the impurity diffusion zone of GaAs single crystals. *Inorganic Materials*. 2005. Vol. 41, N 4. P. 903-906.

References

1. Kovalenko, V. F., Shutov, S. V., Baganov, Ye. A., & Smyikalo, M. M. (2009). Near band-edge luminescence of semi-insulating undoped gallium arsenide at high levels of excitation. *Journal of Luminescence*. **129** (9), 1029-1031. DOI: 10.1016/j.jlumin.2009.04.017
2. Zhukov, N., Kabanov, V., Mihaylov, A., Mosiyash D., & et al. (2018). Peculiarities of the Properties of III–V Semiconductors in a Multigrain Structure. *Semiconductors*. **52** (1), 78-83. DOI:10.1134/S1063782618010256
3. Gabibov, F. S., Zobov, E. M., & Zobov, M. E. (2015). The Effect of Ultrasonic Treatment on the Energy Spectrum of Electron Traps in n-GaAs Single Crystals. *Technical Physics Letters*. **41** (4), 362-365. DOI:10.1134/S1063785015040239
4. Shtan'ko, A. D., Litvinova, M. B., & Kurak, V. V. (2010). Decrease of exciton radiation intensity in compensated gallium arsenide single crystals under influence of low electric field. *Functional Materials*. **17** (1), 46-51.
5. Shishkin, M. I., Zhukov, N. D., & Kryl'skiy, D. V. (2019). On the Synthesis and Photoluminescence and Cathodoluminescence Properties of CdSe, CdTe, PbS, InSb, and GaAs Colloidal Quantum Dots. *Semiconductors*. **53** (8), 1082-1087.
6. Badea, A., Dragan, F., Fara, L., & Sterian, P. (2016). Quantum mechanical effects analysis of nanostructured solar cell models. *Renew Energy and Environmental Sustainability*. **1** (3), 1–5. DOI:10.1051/rees/2016003.
7. Litvinova, M.B., Hertcova, N. Y., & Seliverstova, S. R. (2003). The optical measurement technique of the definition of the GaAs structure deflection degree from stexiometry *Proceedings of CAOL'2003. 1st International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*. 16-20 Sept., Alushta, Ukraine, **2**, 278.
8. Litvinova, M. B., & Shtan'ko, A. D. (2005). Influence of structural defects on the mechanical stress in the impurity diffusion zone of GaAs single crystals. *Inorganic Materials*. **41** (4), 903-906.

Літвінова Марина Борисівна – доктор педагогічних наук, кандидат фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій та фіз.-мат. дисциплін Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: lmb965@gmail.com, ORCID:0000-0002-4917-2132.

Штанько Олександр Дмитрович – кандидат фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та фіз.-мат. дисциплін Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: sadmar954@gmail.com, ORCID:0000-0003-3572-7915.

О.С. МАЗМАНІШВІЛІ, М.Г. РЕШЕТНЯК

Національний Науковий Центр «Харківський Фізико-Технічний Інститут», Харків, Україна

**ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ,
ЩО ЕМИТОВАНІ КАТОДАМИ НЕЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ
В МАГНІТНОМУ ПОЛІ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ**

Розглянути можливі напрями модифікації магнетронної гармати як джерела електронного потоку с катодами, форма яких відрізняється від аксіально-симетричної циліндричної форми. Об'єктом даної роботи є вивчення параметрів електронного пучка, емітованого такими катодами, при його транспортуванні в інтенсивному градієнтному магнітному полі соленоїда і побудова обчислювальної моделі руху електронного потоку в області поля. Удосконалення магнетронної гармати, що полягає у застосуванні інтенсивних магнітних полів з підвищеним градієнтом їхньої напруженості, дає можливість розглянути нові явища в просторовій картині еволюції електронних пучків, а також дослідити вплив стартових характеристик частинок при емісії на тип траєкторій електронів. Метою досліджень стало створення математичних та програмних моделей руху таких електронних пучків з енергією в десятки кеВ у магнітних полях обраної конфігурації, дослідження формування зображень траєкторій електронів пучка від початкових умов та розподілу магнітного поля вздовж осі системи. Використовано математичні та чисельні моделі перетворення дослідних даних аналітичними функціями. У роботі на основі гамільтонового формалізму руху електронів у магнітному полі синтезовано програмний засіб, що дозволяє провести чисельне моделювання динаміки електронних потоків у магнітному полі соленоїда. Наводяться результати чисельного моделювання руху електронного потоку. Отримані результати моделювання свідчать про можливість за умов експерименту встановити режими зображень, перспективних для корегування структурно-фазових властивостей матеріалу мішеней. Потік електронів на виході магнетронної гармати відчуває перебудову радіального розподілу, яка визначається видом магнітного поля та його градієнтом в каналі транспортування пучка. При цьому форма поперечного розподілу на старті також трансформується відповідно впливу поля. У роботі на прикладах чисельно досліджена еволюція поперечних розмірів електронного пучка, що формується магнетронною гарматою від конфігурації магнітного поля в каналі транспортування частинок. Показано, що зі зростанням максимальної амплітуди та/або градієнта поля ефект радіального перетворення (фокусування або дефокусування) пучка є більш виражений. Наведені результати вказують на можливість фокусування, а також дефокусування, електронного пучка, який емітований катодами міліметрових діаметрів, що може бути використано при опроміненні поверхонь циліндричних зразків, які розміщені в області наростаючого або спадаючого магнітного поля.

Ключові слова: електронний пучок, магнетронна гармата, джерело електронів, динаміка часток, градієнтне магнітне поле, математичне моделювання, досліджені дані.

O.S. MAZMANISHVILI, M.G. RESHETNYAK

National Science Center "Kharkiv Institute of Physics & Technology", Kharkiv, Ukraine

FORMATION OF IMAGES BY ELECTRONIC BEAMS, WHAT IS EMITTED BY NON-CYLINDRICAL CATHODES IN THE MAGNETIC FIELD OF THE MAGNETRON GUN

Consider the possible directions of modification of the magnetron gun as the source of electron flow with cathodes, the shape of which differs from the axially symmetrical cylindrical shape. The object of this work is the study of the parameters of the electron beam emitted by such cathodes during its transport in the intense gradient magnetic field of the solenoid and the construction of the computational model of the movement of the electron flow in the field region. The improvement of the magnetron gun, consisting in the application of intense magnetic fields with the increased gradient of their intensity, makes it possible to consider new phenomena in the spatial picture of the evolution of electron beams, as well as to investigate the influence of the starting characteristics of particles during emission on the type of electron trajectories. The purpose of the research was to create the mathematical and software model of the movement of such electron beams with the energy of tens of keV in magnetic fields of the chosen configuration, to study the formation of images of beam electron trajectories from the initial conditions and the distribution of the magnetic field along the axis of the system. Mathematical and numerical models of experimental data transformation by analytical functions are used. In the paper, based on the Hamiltonian formalism of the motion of electrons in the magnetic field, the software tool was synthesized that allows for numerical modeling of the dynamics of electron flows in a magnetic field of a solenoid. The results of the numerical simulation of the movement of the electron flow are given. The obtained simulation results indicate the possibility of establishing image modes promising for correcting the structural and phase properties of the

target material under experimental conditions. The flow of electrons at the output of the magnetron gun undergoes the rearrangement of the radial distribution, which is determined by the type of magnetic field and its gradient in the beam transport channel. At the same time, the shape of the transverse distribution at the start is also transformed according to the influence of the field. In the work, the evolution of the transverse dimensions of the electron beam formed by the magnetron gun from the configuration of the magnetic field in the particle transport channel is numerically studied using examples. It is shown that with the increase in the maximum amplitude and/or field gradient, the effect of radial transformation (focusing or defocusing) of the beam is more pronounced. The given results indicate the possibility of focusing, as well as defocusing, the electron beam emitted by millimeter-diameter cathodes, which can be used to irradiate the surfaces of cylindrical samples placed in the region of the increasing or decreasing magnetic field.

Key words: electron beam, magnetron gun, electron source, particle dynamics, gradient magnetic field, mathematical modeling, experimental data.

Вступ

Опромінювання пучками електронів с заданими параметрами дають можливість корегувати структурно-фазовий стан у поверхневих шарах і змінювати структурні властивості матеріалів. При цьому коло задач, для розв'язання яких використовуються електронні пучки, постійно розширюється. Основна задача полягає в експериментальному дослідженні та чисельному моделюванні динамічних електронних потоків, а також вивченні можливості та ефективності фокусування пучка при транспортуванні у магнітному полі магнетронній гарматі [1, 2, 3]. На основі цих досліджень будуть отримані нові дані по формуванню та транспортуванню щільних електронних трубчатих пучків малого розміру при різних розподілах магнітного поля в каналі транспортування пучка.

На основі магнетронної гармати з вторинноемісійним катодом був створений прискорювач електронів, який використовує осьовий електронний пучок для опромінення металевих мішеней [3]. Як об'єкт дослідження магнетронна гармата має ту перевагу, що, з одного боку, вона може бути модифікована для проведення експериментів різного типу, з іншого боку, незважаючи на складність виконання аналітичного дослідження, для отримання кількісних залежностей цілком можливе застосування обчислювальних методів та порівняння числових результатів з даними експерименту.

Однією з можливих напрямів модифікації магнетронних гармат є використання джерела електронного потоку – катоди, форма яких відрізняється від аксіально-симетричної циліндричної форми. Об'єктом даної роботи є вивчення параметрів електронного пучка, емітованого такими катодами, при його транспортуванні в інтенсивному градієнтному магнітному полі соленоїда і побудова обчислювальної моделі руху електронного потоку в області поля. Метою досліджень стало створення математичної та програмної моделей руху таких електронних пучків з енергією в десятки кеВ у магнітних полях обраної конфігурації, дослідження формування зображень траєкторій електронів пучка від початкових умов та розподілу магнітного поля вздовж осі системи. У роботі на основі гамільтонового формалізму руху електронів у магнітному полі синтезовано програмний засіб, що дозволяє провести чисельне моделювання динаміки електронних потоків у градієнтному магнітному полі. Наводяться результати чисельного моделювання руху електронного потоку. Отримані результати моделювання свідчать про можливість за умов експерименту встановити режими зображень, перспективних для корегування структурно-фазових властивостей матеріалу мішеней.

Актуальність досліджень обумовлена можливістю використання електронних пучків, що формуються магнетронною гарматою, які можуть бути застосовані при створенні надійних джерел електронів для наукових досліджень прискорювальної техніки та їх застосування при створенні первинних електронів, замість термоемісійного бокового катоду, для збудження вторинної емісії в магнетронах з холодним катодом.

Стан проблеми

Електронні пучки різної конфігурації та інтенсивності широко застосовуються в електронно-променевих технологіях, високовольтній імпульсній НВЧ-електроніці, прискорювальній техніці та інше [1-4], при цьому коло завдань, для вирішення яких застосовуються електронні

пучки, постійно розширюється. Проводяться дослідження з електронними пучками з різними енергіями та просторовою конфігурацією. У ННЦ ХФТІ використовуються джерела електронів з холодними катодами, що працюють у режимі вторинної емісії, поміщені в схрещені електричні та магнітні поля, при цьому як джерело електронів використовується магнетронна гармата. Вторинноемісійний механізм генерації пучка такий гарматі, внаслідок його слабо руйнівної дії на матеріал катода, зумовлює збереження емісійних властивостей електронного джерела протягом тривалого часу. Удосконалення магнетронної гармати, що полягає у застосуванні інтенсивних магнітних полів з підвищеним градієнтом їхньої напруженості, дає можливість розглянути нові явища в просторовій картині еволюції електронних пучків, а також дослідити вплив стартових характеристик частинок при емісії на тип траєкторій електронів.

Аналіз останніх результатів і публікацій

На основі магнетронної гармати з вторинноемісійним катодом створено електронний прискорювач, в якому використовується осьовий електронний пучок для опромінення металевих мішеней [3-5], з перспективою опромінення внутрішньої циліндричної поверхні за допомогою радіального пучка. Побудовано програмний засіб, використання якого дає змогу промоделювати основні залежності руху електронного пучка у заданому соленоїдальному магнітному полі [6, 7].

Формулювання мети дослідження

У роботі наводяться результати дослідження динаміки електронного пучка в каналі транспортування та результати чисельного моделювання руху електронного потоку. Досліджується можливість керування параметрів та типу руху електронного пучка обраної форми у градієнтному магнітному полі шляхом цілеспрямованого регулювання початкових умов при емісії. Метою дослідження є виявлення таких режимів роботи магнетронної гармати, у яких можлива реалізація нових типів траєкторій руху електронних пучків.

Головний матеріал дослідження

У роботах [3, 7] докладно розкрито схему магнетронної гармати та методи моделювання руху частинок в неї. На рис. 1 наведено набір прикладів розподілів магнітного поля уздовж осі магнетронної гармати і каналу транспортування пучка, для яких проводилися експерименти та чисельне моделювання руху електронів, що емітовані катодами міліметрових діаметрів, при їх транспортуванні вздовж системи. На рисунку для кожного з полів вказані значення струмів (в амперах) в котушках чотирьох секцій соленоїда.

Було виконано математичне моделювання динаміки пучка і порівняння його результатів з отриманими даними досвіду. Застосування розробленого програмного засобу, заснованого на аналітичній моделі розподілу магнітного поля уздовж осі соленоїда, дозволило, спираючись на масив з дослідних даних на осі транспортування електронів, встановити амплітуду $f(z)$ магнітного поля та її похідну $df(z) / dz$ як аналітичні функції поздовжньої координати z . Було проведено чисельні моделюючі розрахунки по динаміці електронного пучка в розглянутих магнітних полях. В побудованому програмному середовищі використовувалися чисельний метод Монте-Карло і метод Рунге-Кутти.

Отримано розв'язок прямої задачі моделювання траєкторій електронів для заданих початкових умов і параметрів системи. Наведено розрахункові залежності розподілу пучка електронів (обсяг вибірки до 500 частинок) у площині мішені.

Чисельно досліджена залежність радіальних розмірів електронного пучка різної форми, що формується магнетронною гарматою в каналі транспортування при однорідному, спадаючому та наростаючому магнітному полі.

На рис. 2a показана послідовність розрахункових поперечних перетин розподілу пучка в однорідному магнітному полі, а на рис. 2b приведена розрахункова залежність середнього

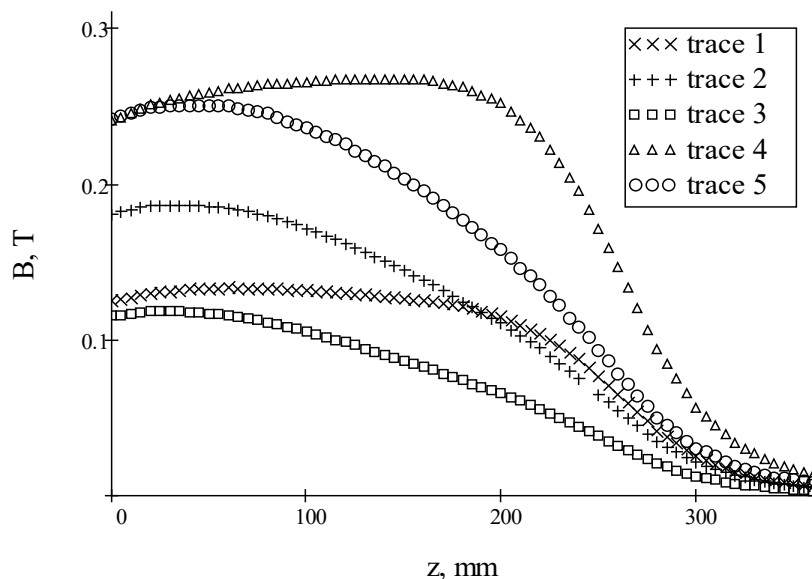


Рис. 1. Розподіли соленоїдального магнітного поля B вдовж осі гармати (криві 1...5) (діаметр катода $D_C=3$ мм, діаметр анодів $D_A=15$ мм і 50 мм), 1 – $B_1=(35,47,30,75$ А), 2 – $B_2=(25,41,26,0$ А), 3 – $B_3=(15,28,14,30$ А), 4 – $B_4=(15,28,14,0$ А), 5 – $B_5=(37,50,40,0$ А)

радіуса r пучка електронів міліметрового розміру від координати z . Розрахунки виконані для поля, наведеного на рис. 2 (крива 1). З рисунків можна бачити, що при зменшенні амплітуди магнітного поля середній радіус пучка збільшується.

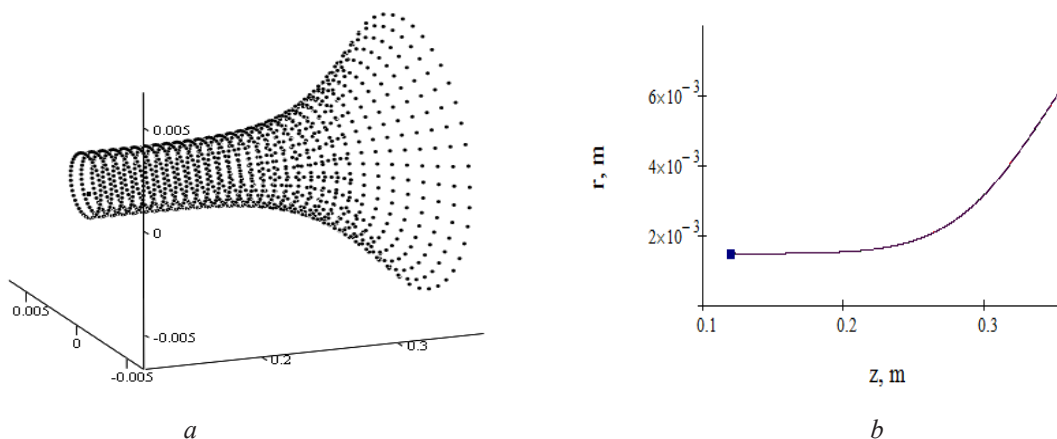


Рис. 2. a – розрахункові поперечні перетини розподілу пучка в однорідному магнітному полі, діаметр катода $D_C=3$ мм, діаметр анода $D_A=15$ мм, $B=(35,47,30,75$ А); b – розрахункова залежність середнього радіуса r пучка від координати z

Було проведено чисельне моделювання для випадку двох конфігурацій магнітного поля, з якими проводилися дослідження еволюції радіальних розмірів електронного пучка, який генерується магнетронною гарматою. Чисельні розрахунки проводилися з метою моделювання руху частинок на інтервалі від $z_0=120$ мм на старті до $z=285$ мм на фініші при різних максимальних амплітудах (0,27 Т і 0,37 Т) градієнтного магнітного поля в каналі транспортування електронного потоку. Конфігурація обох градієнтних магнітних полів наведена на рис. 3.

Перше з них формувалося набором струмів $B=(15,28,14,30 \text{ A})$ в котушках соленоїда сумісно з постійним магнітом M (див. рис. 3а). Друге магнітне поле формувалося за допомогою такого ж набору струмів $B=(15,28,14,30 \text{ A})$ в котушках соленоїда, але сумісно з двома постійними магнітами $M+M$ (див. рис. 3б).

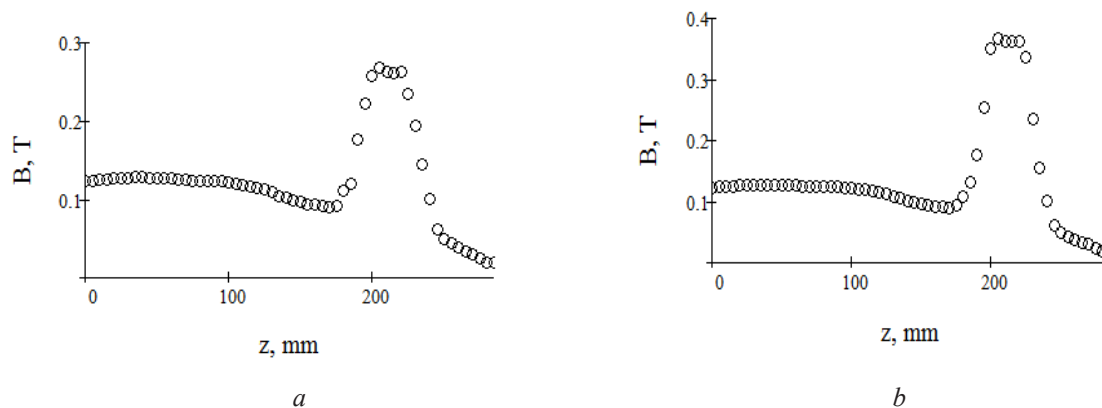


Рис. 3. Розподіли градієнтного магнітного поля вздовж осі гармати та властивості пучка;
 а – наростаюче магнітне поле створено сумісно соленоїдом з постійним магнітом;
 б – наростаюче поле створено сумісно соленоїдом з двома постійними магнітами

Був розглянутий випадок з двох катодів радіусом $R_C=2 \text{ мм}$ кожний з центрами в точках $(6 \text{ мм}, 6 \text{ мм})$ та $(-6 \text{ мм}, -6 \text{ мм})$ на площині старту. Результати моделювання для випадку цих двох циліндричних катодів наведено на рис. 4.

На рис. 4а можна бачити початкові розподіли частинок електронного пучка, які були обрано однаковими для обох полів.

На рис. 4б зображена послідовність поперечних перетинів пучка для обох випадків поля. З рисунків 4б можна бачити, що профілі пучка відслідковують розподіли магнітних полів вздовж осі системи z .

На рис. 4с показано залежності середнього радіуса пучка $r=r(z)$ для обох полів від поздовжньої координати z (квадратик – старт руху). Можна бачити значне зменшення розмірів пучка в області, в якій збільшилася амплітуда магнітного поля. Таким чином, зі зростанням максимальної амплітуди та/або градієнта поля ефект радіального фокусування пучка є більш виражений.

З метою порівняння було проведено чисельне моделювання для випадку конфігурації, яка містить чотири квадратних катода (див. рис. 5а) та двох конфігурацій магнітного поля. Чисельні розрахунки проводилися з метою моделювання руху частинок від $z_0=120 \text{ мм}$ на старті до $z=285 \text{ мм}$ на фініші при різних максимальних амплітудах $(0,27 \text{ Т}$ і $0,37 \text{ Т})$ наростаючого магнітного поля. Конфігурація обох градієнтних магнітних полів наведена на рис. 3.

Результати моделювання для випадку наведено на рис. 5.

На рис. 5а можна бачити початкові розподіли частинок електронного пучка з 4 квадратних катода, які були обрано однаковими для обох полів.

На рис. 5б зображено поперечні перетини частинок пучка для обох випадків поля. З рисунків 5б можна бачити, що профілі пучка відслідковують розподіли магнітних полів вздовж осі системи z .

На рис. 5с показано залежності середнього радіуса пучка $r=r(z)$ для обох полів від поздовжньої координати z (квадратик – старт руху). Можна бачити помітне зменшення розмірів пучка в області, в якій збільшилася амплітуда магнітного поля. Таким чином, зі зростанням максимальної амплітуди та/або градієнта поля має місце ефект радіального фокусування пучка обраної конфігурації.

З рис. 5с та рис. 4с можна зробити висновок, що загальна тенденція такого ефекту залишається незмінною для різних стартових густин електронного пучка.

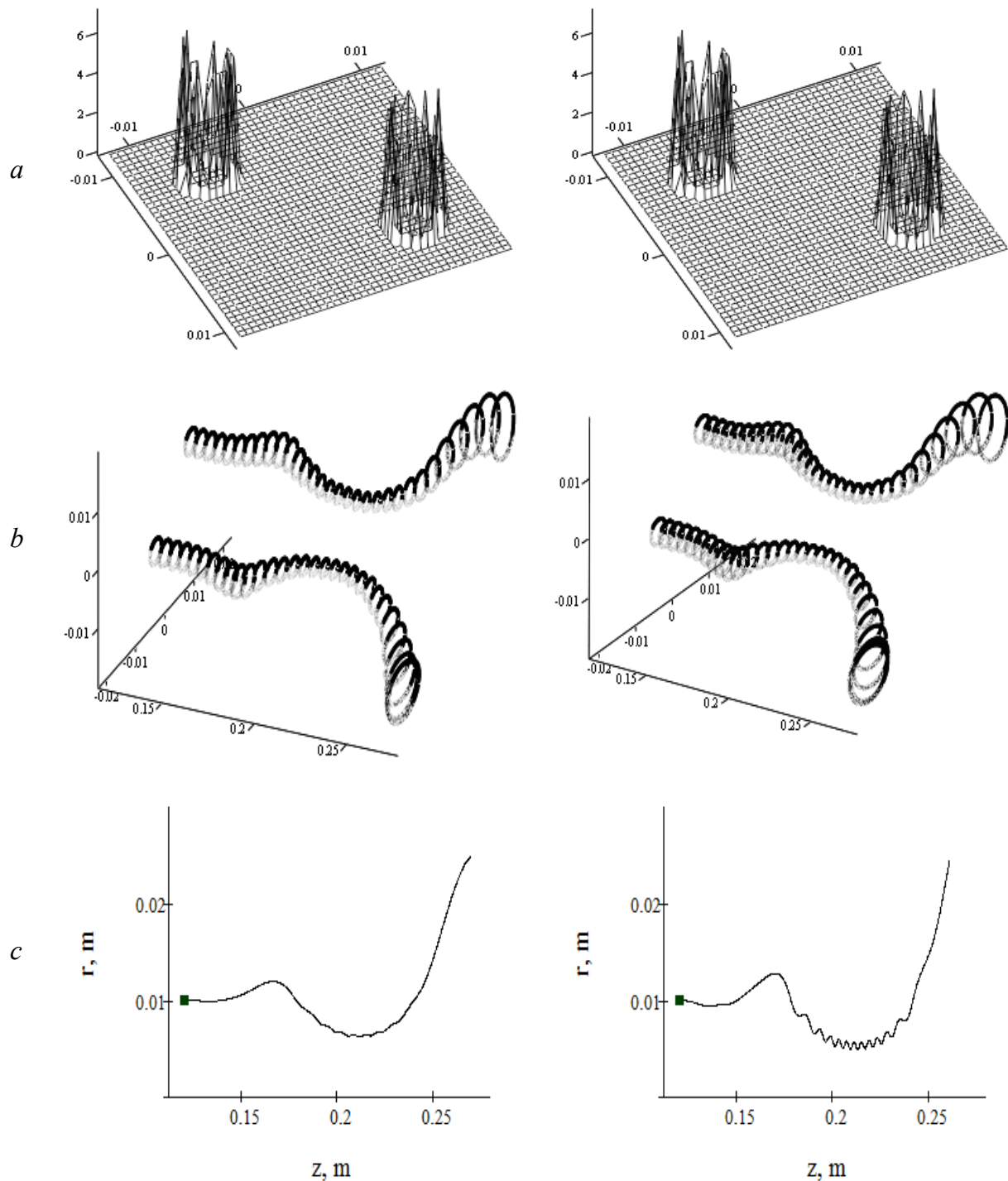


Рис. 4. Розподіли градієнтного магнітного поля вздовж осі гармати та властивості пучка; випадок з двох катодів радіусом $R_c=2$ мм кожний з центрами в точках (6 мм, 6 мм) та (-6 мм, -6 мм) на площині старту; ліворуч – наростаюче магнітне поле створено сумісно соленоїдом з постійним магнітом; праворуч – наростаюче поле створено сумісно соленоїдом з двома постійними магнітами;
a – початкові розподіли частинок пучка;
b – послідовність поперечних перетин пучка;
c – розрахункові залежності середнього радіуса r пучка від координати z

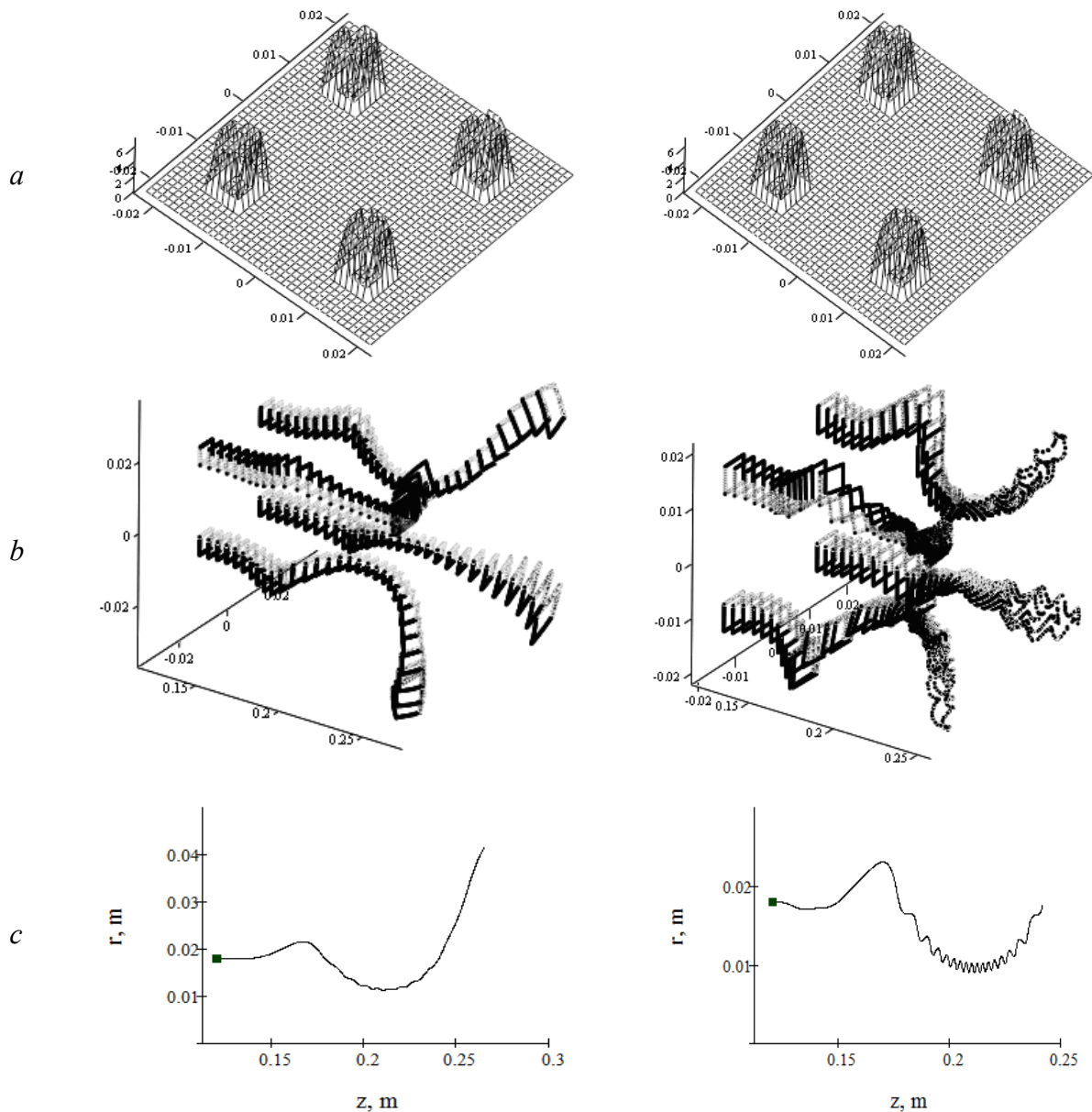


Рис. 5. Розподіли градієнтного магнітного поля вздовж осі гармати та властивості пучка в випадку конфігурації, яка містить 4 квадратних катода;
 ліворуч – магнітне поле створено сумісно соленоїдом з постійним магнітом;
 праворуч – поле створено сумісно соленоїдом з двома постійними магнітами;
a – початкові розподіли частинок пучка;
b – послідовність поперечних перетин пучка;
c – розрахункові залежності середнього радіуса r пучка від координати

Висновки

Потік електронів на виході магнетронній гармати відчуває перебудову радіального розподілу, яка визначається видом магнітного поля та його градієнтом в каналі транспортування пучка. При цьому форма поперечного розподілу, обраного на старті, також трансформується відповідно впливу поля. У роботі на прикладах різних форм поперечного розподілу на старті чисельно досліджена еволюція поперечних розмірів електронного пучка, що формується

магнетронною гарматою від конфігурації магнітного поля в каналі транспортування частинок. Показано, що зі зростанням максимальної амплітуди та/або градієнта поля ефект радіального перетворення (фокусування або дефокусування) пучка є більш виражений. Наведені результати вказують на можливість фокусування/дефокусування, електронного пучка різних форм, який емітований катодами міліметрових діаметрів, що може бути використано при опроміненні поверхонь зразків, які розміщені в області магнітного поля.

Список використаної літератури

1. Dovbnya A.N., Lavrinenko S.D., Zakutin V.V. Surface modification of zirconium and Zr1%Nb alloy by the electron beam of the magnetron gun-based accelerator. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science"*. 2011, № 2. P. 39-45.
2. Ayzatsky M.I., Dovbnya A.N., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Romasko V.P., Chertishchev I.A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016. Iss. 66. № 3(103). P. 11-16.
3. Dovbnya A.N., Dovbnya N.A., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Chertishchev I.A. Transport simulation of a high-current electron beam formed by the magnetron gun with a secondary-emission cathode in a decreasing solenoid field. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2015. № 6. P. 77-82.
4. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Electron beam transversion management on exit of magnetic gun by gradient magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2019. Iss. 72, № 6(124). P. 106-113.
5. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Shovkoplyas O.A. Beam and sector modes of electron fluxes in cylindrical magnetic field of magnetron gun. *Journal of Nano- and Electron Physics*. 2020. Vol. 12, № 3, 03001(5pp).
6. Dovbnya A.N., Dovbnya N.A., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Longitudinal-radial motion of an electron beam in the solenoidal field of the secondary-emission magnetron gun. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2017. Iss. 69. № 6(112). P. 96-100.
7. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Transformation of the data array of the cylindrical magnetic field of the magnetron gun and the problem of the radial motion of electrons. *Applied Problems of Mathematical Modeling*. 2020. Vol. 3, № 1. P. 108-116.

References

1. Dovbnya, A.N., Lavrinenko, S.D., & Zakutin, V.V. (2011) Surface modification of zirconium and Zr1%Nb alloy by the electron beam of the magnetron gun-based accelerator. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science"*. **2**, 39-45.
2. Ayzatsky, M.I., Dovbnya, A.N., Mazmanishvili, A.S., Reshetnyak, N.G., Romasko, V.P., & Chertishchev, I.A. (2016). Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. **3(103)** (66), 11-16.
3. Dovbnya, A.N., Dovbnya, N.A., Mazmanishvili, A.S., Reshetnyak, N.G., & Chertishchev, I.A. (2015). Transport simulation of a high-current electron beam formed by the magnetron gun with a secondary-emission cathode in a decreasing solenoid field. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. **6**, 77-82.
4. Mazmanishvili, A.S., & Reshetnyak, N.G. (2019). Electron beam transversion management on exit of magnetic gun by gradient magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. **6(124)** (72), 106-113.

5. Mazmanishvili, A.S., Reshetnyak, N.G., & Shovkoplyas, O.A. (2020). Beam and sector modes of electron fluxes in cylindrical magnetic field of magnetron gun. *Journal of Nano- and Electron Physics*. **12** (3), 03001(5pp).
6. Dovbnya, A.N., Dovbnya, N.A., Mazmanishvili, A.S., & Reshetnyak, N.G. (2017). Longitudinal-radial motion of an electron beam in the solenoidal field of the secondary-emission magnetron gun. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. **6(112)** (69), 96-100.
7. Mazmanishvili, A.S., & Reshetnyak, N.G. (2020). Transformation of the data array of the cylindrical magnetic field of the magnetron gun and the problem of the radial motion of electrons. *Applied Problems of Mathematical Modeling*. **3** (1), 108-116.

Мазманішвілі Олександр Сергійович – доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, e-mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0373-0626.

Решетняк Микола Григорович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua, ORCID: 0000-0002-2345-6789.

Д.А. НАГОВСЬКИЙ, Г.Г. ДОЩЕНКО
Херсонська державна морська академія

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПОСТЕРІГАЧА ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ УТРИМАННЯМ ПОЛОЖЕННЯ СУДНА

У статті розглядається синтез моделі спостерігача для системи керування положенням судна на основі використання комплексної моделі, що складається з двох складових: моделі системи керування позиціонування та моделі, що дозволяє реагувати цій системі на зовнішні подразники у вигляді певних погодних умов.

Моделі оцінки кількісних та якісних показників сучасних систем управління судном засновані на застосуванні узагальненої математичної моделі, яка може набувати різних форм залежно від впливу численних факторів на їх структуру та параметри.

Сучасні системи управління судном та судновими енергетичними установками є автоматизованими технічними комплексами високої складності, що призначені для ефективного виконання операцій, які визначаються призначенням та специфікою роботи судна в конкретних умовах.

Високоточні системи позиціонування створені на основі замкнутих систем управління з використанням PID та PID² регуляторів у системах підтримки тяги та положення судна.

Математична модель судна є складною системою нелінійних диференціальних рівнянь, інтегрування яких можливе лише чисельними методами з спрямованістю на результати, придатні для вирішення практичних завдань.

У цій статті авторами вирішується актуальне завдання використання спостерігача за зовнішніми факторами при позиціонуванні судна, завданням якого є подання коригувального сигналу до основної системи управління з урахуванням впливу на положення судна погодних умов. Одним із способів рішення запропоновано використовувати модель, що дозволяє використовувати поточні фактори збурення, що діють на судно, та генерувати коригування для системи позиціонування з урахуванням прогнозу щодо зміни значень цих факторів. У роботі представлені результати у вигляді графіків зміни відхилення позиції судна, що базуються на отриманій моделі спостерігача, синтез якої так само описаний у статті. Також у статті показані порівняльні результати з використанням спостерігача і без його використання.

Ключові слова: судно, модель, керування, система управління, позиціонування, спостерігач, контролер.

D.A. NAHOVSKYI, H.G. DOSHCENKO
Kherson State Maritime Academy

MATHEMATICAL MODEL OF THE OBSERVER FOR THE VESSEL POSITION MAINTENANCE CONTROL SYSTEM

The article considers the synthesis of the observer model for the ship position control system based on the use of a comprehensive model consisting of two components: the positioning control system model and the model that allows this system to respond to external stimuli in the form of certain weather conditions.

Models for estimating the quantitative and qualitative indicators of modern ship management systems are based on the use of a generalized mathematical model, which can take different forms depending on the influence of numerous factors on their structure and parameters.

Modern control systems for ships and ship power plants are automated technical complexes of high complexity, designed to effectively perform operations that are determined by the purpose and specifics of the ship in specific conditions.

High-precision positioning systems are based on closed control systems using PID and PID² controllers in traction and position support systems.

The mathematical model of the ship is a complex system of nonlinear differential equations, the integration of which is possible only by numerical methods with a focus on results suitable for solving practical problems.

In this article the author solves the urgent problem of using an observer of external factors in the positioning of the vessel, whose task is to provide a corrective signal to the main control system, taking into account the impact on weather conditions. One solution is to use a model that allows the use of current disturbance factors acting on the ship and to generate adjustments for the positioning system based on the forecast of changes these factor's values. The paper presents the results in the form of graphs of changes in the deviation of the position of the vessel, based on the obtained model of the observer; the synthesis of which is also described in the article. The article also shows comparative results with the use of the observer and without its use.

Keywords: ship, model, control, control system, positioning, observer, controller.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фільтрація та оцінка стану є важливими функціями для всіх видів систем керування. Вимірний сигнал дуже часто містить шум, який може негативно вплинути на продуктивність контролера, якщо не врахувати цього в системах динамічного позиціонування або при швартуванні [1 - 3]. Основними призначеннями оцінювачів стану (спостерігачів) у системах управління утриманням положення судна є:

– Відновлення невимірних даних. Для багатьох способів використання важливі стани процесів не вимірюються. Типовими причинами цього є відсутність зручних датчиків, або підвищена вартість їх застосування. У таких випадках можна застосувати складні методи фільтрації на основі моделі – оцінку стану. Основне призначення оцінювача стану полягає в тому, щоб відновити невимірні сигнали та виконати фільтрацію до того, як сигнали будуть використані в системі керування зі зворотним зв'язком.

– Розахунок на вихід системи керування з ладу. Будь-який вид обладнання виходить з ладу відповідно до певної частоти відмов. Досвід промислових застосувань показав, що одна з найчастіших поломок системи управління спричинена несправністю датчиків. У критичних для безпеки застосування на морі раптове відключення системи керування може призвести до небезпечних ситуацій, якщо не відбудеться адекватна заміна сигналу. Застосовуючи фільтри на основі моделі, сигнал може, принаймні на деякий період часу, замінити вимірюваний сигнал шляхом прогнозування моделі.

– Фільтрація хвиль. Рух морських суден можна розділити на низькочастотну (НЧ) складову та складову частоти хвиль (ХЧ). Для більшості застосувань позиціонування рух ХЧ не підлягає контролю. Причиною цього може бути те, що рух ХЧ не має значення для конкретної операції, або що судно не має достатньої потужності та потужності тяги, щоб взагалі здійснити помітну компенсацію. Останнє є найпоширенішою причиною. Тому доцільно використовувати фільтрацію для компенсації впливу ХЧ.

Викладення основного матеріалу дослідження

З вищесказаного випливає, що доцільно розділити моделі морських суден на модель низькочастотну (НЧ) та модель хвильового впливу (ХЧ). Нелінійні рівняння НЧ руху обумовлені середнім значенням 2-го порядку і повільно змінними хвильовими, поточними та вітровими навантаженнями, а також силами двигуна. Рух судна ХЧ зумовлений хвильовими навантаженнями 1-го порядку [3]. Для проектування спостерігача та контролера на основі моделі достатньо вивести спрощену математичну модель, модель керуючого заводу, яка, тим не менш, досить детальна, щоб описати основні фізичні характеристики динамічної системи.

Низькочастотна модель описана в [3] та має вигляд:

$$M\dot{v} + C_{RB}(v)v + C_A(v_r)v_r + D(k, v_r) + G(\eta) = \tau_{env} + \tau_m + \tau_i + \tau_{thr}, \quad (1)$$

де $M\dot{v}$ – узагальнені сили інерції; $C_{RB}(v)v$ – узагальнені сили Коріоліса і доцентрові сили; $D(k, v_r)$ – узагальнені сили загасання та поточні сили; $G(\eta)$ – узагальнені відновлювальні сили; τ_{env} – навантаження навколишнього середовища, які повільно змінюються, за винятком поточних навантажень, що діють на судно; τ_m – навантаження при швартуванні; τ_i – навантаження від рівня льоду; τ_{thr} – узагальнені сили, створені пропульсивною системою.

Спростимо (1) і отримаємо нелінійну модель установки керування НЧ при помпажах, хитаннях і ризканнях щодо нульової швидкості судна:

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (2)$$

$$M\dot{v} + D(v) + R^T(\psi)G(\eta) = \tau + R^T(\psi)b, \quad (3)$$

де $v = [u, v, r]^T$, $\eta = [x, y, \psi]^T$, $b \in R^3$ – вектор зміщення, та $\tau = [\tau_x, \tau_y, \tau_\psi]^T$ – керуючий вхідний вектор. При цьому модель системи управління є нелінійною через матрицю обертання:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Для низько швидкісних варіантів матриці визначаються відповідно:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{U}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{V}} & mx_G - Y_r \\ 0 & mx_G - N_{\dot{V}} & I_z - N_r \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} -X_x & 0 & 0 \\ 0 & -Y_y & 0 \\ 0 & 0 & -N_{\psi} \end{bmatrix}.$$

Для моделі хвильового впливу використовуються синтетичні процеси, керовані білим шумом, що складаються з незв'язаних гармонійних коливань із загасанням. Модель запишеться у формі простору-стану:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{\omega} &= \xi_{\omega} A_{\omega} + E_{\omega} w_{\omega}, \\ \eta_{\omega} &= C_{\omega} \xi_{\omega}, \end{aligned}$$

де $\eta_{\omega} \in R^3$ – вектор вимірювання положення та орієнтації, $w_{\omega} \in R^3$ – вектор білого шуму Гауса з нульовим середнім значенням, $\xi_{\omega} \in R^6$. Тобто, для відображення збурення хвиль достатньо лінійної моделі другого прядку. Тоді, системна матриця $A_{\omega} \in R^{6 \times 6}$, матриця збурень $E_{\omega} \in R^{6 \times 3}$ і матриця вимірювань $C_{\omega} \in R^{3 \times 6}$ запишуться:

$$A_{\omega} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ -\Omega^2 & -2\Lambda\Omega \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$C_{\omega} = [0_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3}], \quad E_{\omega} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ K_{\omega} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

де $\Omega = \text{diag}\{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$, $\Lambda = \text{diag}\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3\}$, $K_{\omega} = \text{diag}\{K_{\omega 1}, K_{\omega 2}, K_{\omega 3}\}$. Ця модель відповідає:

$$\frac{\eta_{\omega i}}{\omega_{\omega i}}(s) = \frac{K_{\omega i} s}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}. \tag{6}$$

З практичної точки зору, параметри ХЧ моделі є відносно повільно змінними величинами залежно від переважаючого стану моря. Як правило, періоди хвиль T_i , що відповідає частоті хвиль $\omega_i = 2\pi / T_i$, знаходяться в діапазоні від 5 до 20 секунд, а відносний коефіцієнт затухання ζ_i – в діапазоні від 0,05 до 0,1. Тому, з деякою мірою, можна використовувати адаптивні схеми спостерігачів для різних морських умов, але при невеликих довжинах хвилі.

Для реалізації прогнозування, або упередження, можна використати модель першого порядку Маркова [4]:

$$\dot{b} = -T_b^{-1} b + E_b w_b,$$

де $b \in R^3$, w_b – вектор білого шуму Гауса з нульовим середнім значенням, $T_b \in R^{3 \times 3}$ – діагональна матриця постійних часу зміщення, $E_b \in R^{3 \times 3}$ – діагональна матриця масштабування. Така модель зміщення враховує повільно змінювані сили та моменти через хвильове навантаження 2-го порядку, океанські течії та вітер. Крім того, модель зміщення також може бути представлена як випадкове блукання, тобто процес Вінера:

$$\dot{b} = E_b w_b.$$

Рівняння, яке відповідає за вимірювання необхідної тяги має вигляд:

$$y = \eta + \eta_{\omega} + v,$$

де $v \in R^3$ – вектор білого шуму Гауса з нульовим середнім значенням.

В результаті, кінцева модель управління з урахуванням спостерігача, запишеться:

$$\dot{\xi}_{\omega} = \xi_{\omega} A_{\omega} + E_{\omega} w_{\omega},$$

$$\dot{\eta} = R(\psi)v,$$

$$\dot{b} = E_b w_b$$

(7)

$$M\dot{v} = -D(v) - R^T(\psi)G(\eta) + \tau + R^T(\psi)b,$$

$$y = \eta + C_{\omega}\xi + v$$

Для апробації моделі використовувався нелінійний PID-регулятор. Експериментальна установка наведена на рис. 1.

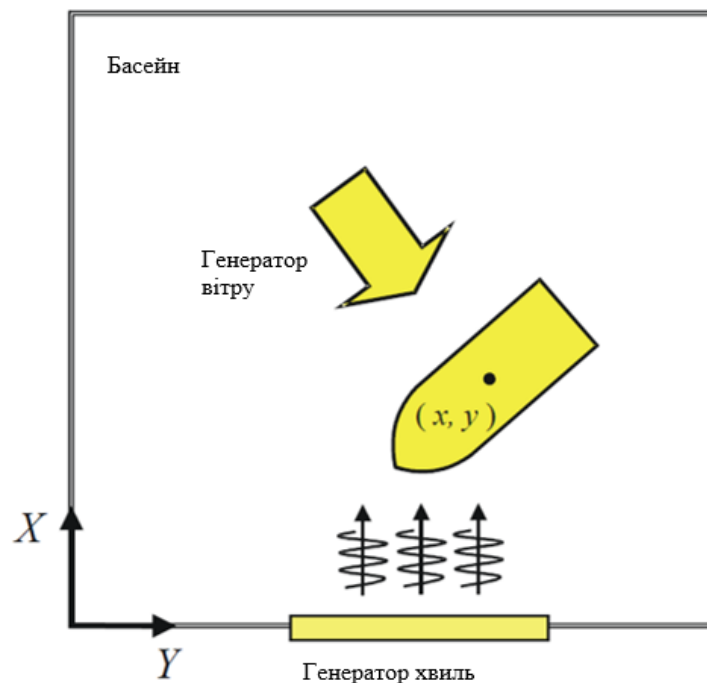


Рис. 1. Експериментальна установка: маса макету – 15 кг;
Довжина макету – 1,2 м; період хвиль -7с.

Експеримент виконувався в три фази:

– Етап 1: без хвиль. Спочатку судно зберігає потрібне положення і курс без впливу навколишнього середовища на судно. Орієнтовний курс становить -140 градусів. При зборі даних включається генератор вітру. Спостерігач не працює.

– Етап 2: поява хвиль. Через 1650 секунд запускається генератор хвиль. На цій фазі ми можемо побачити роботу спостерігача з урахуванням компенсації вітру та без урахувань ХЧ.

– Етап 3: вітер, хвилі, спостерігач працює повністю після 2760 секунд.

На рис. 2 зображено виміряні відхилення положення та курсу, нанесені разом із відповідними прогнозами НЧ-частини моделі спостерігача.

Ефект використання НЧ+ХЧ моделі добре видно на рис. 3, відхилення значно зменшуються під час етапу 3.

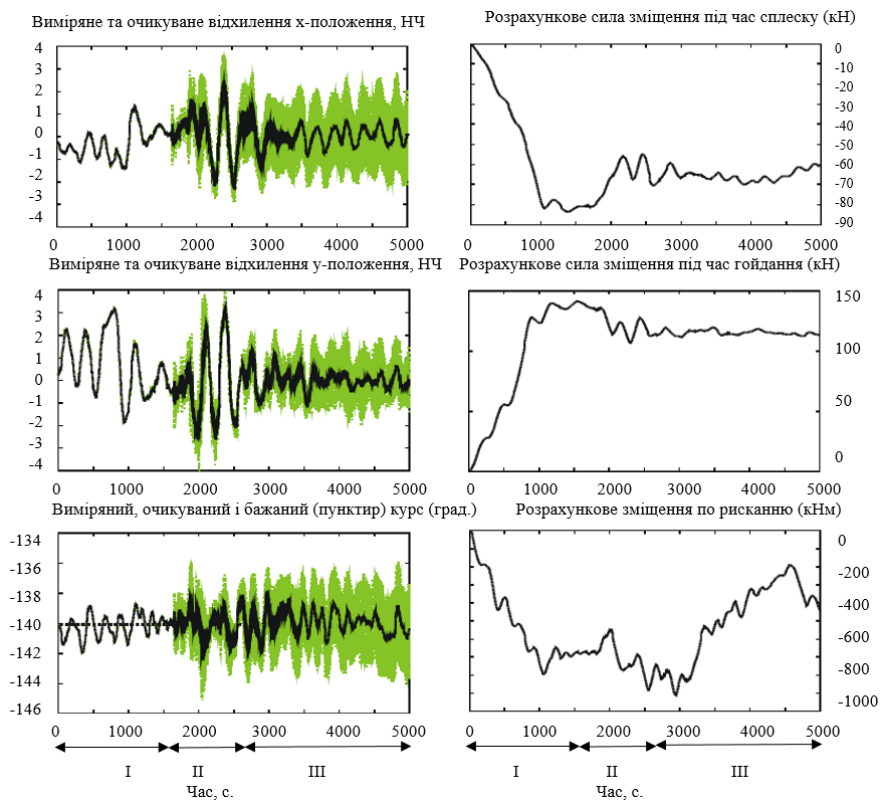


Рис. 2. Відхилення положення та курсу: виміряні, очікувані та бажані

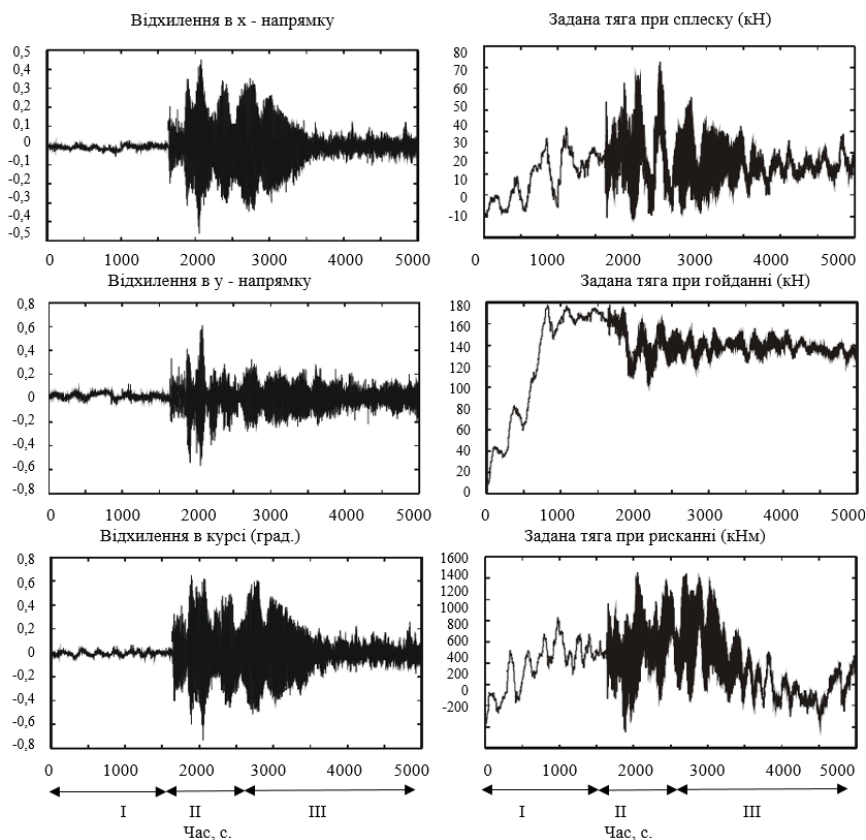


Рис. 3. Результати при використанні спостерігача з НЧ та ХЧ складовими

До того ж, збільшення частоти вимірювань показує прогресивне прогнозування НЧ при активізації ХЧ частини моделі спостерігача. Отже видно, що використання спостерігача в моделі впливу хвиль на судно значно підвищує результати статичної моделі керування при різних станах морської поверхні.

Висновки

У результаті всебічного аналізу проблематики безпеки мореплавання при різних станах морської поверхні, можна зробити висновок, що використання спостерігача в моделі впливу хвиль на судно значно підвищує результати статичної моделі керування. Ефект сукупного використання при русі морських суден низькочастотної (НЧ) складової та складової частоти хвиль (ХЧ) в моделі добре видно, що відхилення значно зменшуються під час управління динамічним позиціонуванням рухомого об'єкту водного транспорту в гетерогенно збуреному локально обмеженому просторі акваторії техноприродного комплексу.

Перелік використаних джерел

1. Fossen T. I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Chichester, England: JohnWiley & Sons Ltd., 1994. 494p.
2. Fossen T. I. *Marine Control Systems, Guidance, Navigation, and Control of Ships*. Trondheim, Norway: *Marine Cybernetics*, 2002. 570p.
3. Strand J. P. *Nonlinear Position Control Systems Design for Marine Vessels*. Doctoral Dissertation, Trondheim, Norway: *Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Cybernetics*, 1999. 193p.
4. Доценко Г.Г., Наговський Д.А. Автоматизована система управління змащуванням головного двигуна судна. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал*. Херсон: Херсонська державна морська академія. 2021. № 1 (24). С. 92-104.

References

1. Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Chichester, England: JohnWiley & Sons Ltd. 494.
2. Fossen, T. I. (2002). *Marine Control Systems, Guidance, Navigation, and Control of Ships*. – Trondheim, Norway: *Marine Cybernetics*, 570.
3. Strand, J. P. (1999). *Nonlinear Position Control Systems Design for Marine Vessels*. Doctoral Dissertation, Trondheim, Norway: *Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Cybernetics*. 193.
4. Doshchenko, H.H., & Nahovskyi, D.A. (2021). *Avtomatyzovana systema upravlinnia z mashchuvanniam holovnoho dvyhuna sudna*. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii : naukovyi zhurnal*. 1 (24). 92-104.

Наговський Дмитро Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: dymon.ksu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6920-0324.

Доценко Галина Геннадіївна – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: hersongala@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1004-4934.

О.М. ПАВЛЕНКО, Е.Г. МУРТАЗИЄВ, В.М. ВЕРЕЩАГА
Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького
Мелітопольська школа прикладної геометрії імені Володимира Найдюша

ТОЧКОВІ ПОЛІНОМИ ЯК КОМПОЗИЦІЙНІ ГЕОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ

Надано означення точкових поліномів, вказується, що їх рівняння є безвідносними щодо вихідної системи координат, а утворюються відносно базисних точок дискретної кривої на основі якої складається цей точковий поліном. У загальному вигляді записано рівняння однопараметричного точкового поліному. Надано означення однопараметричних характеристичних функцій і їх вирази у загальному вигляді, показано послідовність параметризації кривих ліній для визначення параметрів у базисних точках з метою їхнього застосування для обчислення характеристичних функцій. Надано послідовність перетворення характеристичних функцій у БН-координати однопараметричних точкових поліномів, яку названо гармонізацією характеристичних функцій. З використанням БН-координат, у загальному вигляді, надано рівняння гармонізованого точкового поліному. Вказується на переваги застосування гармонізованих точкових поліномів перед негармонізованими.

Надається, у загальному вигляді, рівняння двопараметричного точкового поліному та його характеристичних функцій для усіх базисних точок за обома параметричними напрямками U та V . Наголошується, що кожна базисна точка вихідної дискретно поданої поверхні обирається лише в місцях перетину каркасів ліній, утворених за двома параметричними напрямками. Через це кожна базисна точка має дві характеристичні функції, тобто визначається двома координатами у відповідності до кожного із параметричних напрямків. Розроблено, у загальному вигляді для двох параметричних напрямків, методику обчислення значень параметрів у всіх його базисних точках, які використовуються, у подальшому, для складання виразів характеристичних функцій. Наголошується, що реалізація операцій множення характеристичних функцій та БН-координат між собою і на базисні точки для складання точкових поліномів, найліпше здійснювати у компоматричній формі. Надаються, у загальному вигляді, приклади множення між собою компоматриць параметричних і множення компоматриці точкової на параметричну. При цьому, наголошується, що операції множення двох компоматриць здійснюються лише поміж їхніх елементів, які мають однаковими чи то одинарні, чи то подвійні індекси. Звертається увага на особливості гармонізації двопараметричних характеристичних функцій і точкових поліномів. Надається загальний вигляд гармонізованого двопараметричного точкового поліному.

Ключові слова: точкові поліноми, характеристичні функції, БН-координати, композиційна інтерполяція, гармонізовані точкові поліноми.

O.M. PAVLENKO, E.G. MURTAZIEV, V.M. VERESHCHANA
Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University
Melitopol School of Applied Geometry named after Volodymyr Naidysh

POINT POLYNOMS AS COMPOSITE GEOMETRIC MODELS

The definition of point polynomials is given, it is indicated that their equations are irrelevant to the original coordinate system, but are formed relative to the base points of the discrete curve on the basis of which this point polynomial is formed. In its general form, the equation of a one-parameter point polynomial is written. The definition of one-parameter characteristic functions and their expressions in a general form is provided, the sequence of parametrization of curved lines for determining parameters at base points with the aim of their application for calculating characteristic functions is shown. The sequence of transformation of characteristic functions into BN-coordinates of one-parameter point polynomials is given, which is called harmonization of characteristic functions. With the use of BN-coordinates, in a general form, the equation of the harmonized point polynomial is given. The advantages of using harmonized point polynomials over non-harmonized ones are indicated.

The equation of a two-parameter point polynomial and its characteristic functions for all base points along both parametric directions U and V are provided, in general form. It is emphasized that each base point of the original discretely presented surface is chosen only at the intersections of the line frames formed along the two parametric directions. Because of this, each base point has two characteristic functions, that is, it is determined by two coordinates in accordance with each of the parametric directions. A method of calculating the values of parameters at all its base points, which are used, in the future, for compiling expressions of characteristic functions, has been developed, in a general form, for two parametric directions. It is emphasized that the implementation of the operations of multiplication of characteristic functions and BN-coordinates between themselves and on base points for the compilation of point polynomials is best carried out in compomatrix form. In a general form, examples of multiplication of parametric compomatrixes and multiplication of a point compomatrix by a parametric one are provided. At the same time, it is emphasized that the operations of

multiplication of two compomatrices are carried out only between their elements, which have the same either single or double indices. Attention is drawn to the peculiarities of the harmonization of two-parameter characteristic functions and point polynomials. A general view of the harmonized two-parameter point polynomial is provided.

Key words: point polynomials, characteristic functions, BN-coordinates, composite interpolation, harmonized point polynomials.

Постановка проблеми

Однією із проблем традиційних методів поліноміальної інтерполяції є виникнення неконтрольованої осциляції на інтерполянтах, яка спотворює форму кривої за великої кількості вузлів інтерполяції. Для уникнення цієї осциляції застосовується поділення вихідної дискретно поданої кривої на декілька сегментів, до яких застосовується сплайнінтерполяція, зокрема нерівномірні раціональні B-сплайни (NURBS). Наразі нічого кращого ніж NURBS-технології в автоматизованих системах проектування і виробництва не існує. Однак, для моделей з великими даними таке поділення призводить до збільшення ресурсоемності програмних продуктів. Крім того, B-сплайни утворюють задовільну форму кривої але вона не проходить через усі вихідні точки. Виходячи зі сказаного, виникає проблема в необхідності розробки нових методів інтерполяції, які б одним рівнянням, без сегментування описували б, проходячи через усі точки, геометричні об'єкти довільної форми за наперед визначеними умовами, мали велику кількість вузлів інтерполяції і, при цьому, високий степінь інтерполянта, навіть за наявних на ньому точок перегину, не викликав би великих амплітуд відхилення від початкового дискретно поданого геометричного об'єкту, які б створювали його в аналітичному поданні. В окремих випадках, для визначеної кількості базисних точок, цю задачу раніше було розв'язано у джерелах, на які вказуватиметься у аналізі останніх досліджень. Однак, у загальному вигляді, для n базисних точок, ця проблема у даній статті, викладається вперше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із основних призначень композиційного геометричного моделювання [1], [2], [3] є оцифрування графічних рішень шляхом утворення, замість них, обчислювальних алгоритмів з метою аналізу великих баз даних.

Підґрунтям для виникнення композиційного геометричного моделювання стало точкове числення Балюби-Найдиша (точкове БН-числення) [4], [5]. Із згаданих наукових напрямів, у цьому аналізі, коротко торкнемося аналізу лише того матеріалу, який у подальшому буде застосований в основному тексті статті.

Композиційні геометричні об'єкти не є функціями аргументів у системах координат. Їх рівняння утворюються відносно базисних точок, які початково дискретно визначають ці об'єкти. Базисними точками є мінімальна їх кількість, що належать об'єкту, яка здатна породити весь континуум його множини, за застосуванням певного алгоритму, що відтворює форму цього об'єкту.

Утворення однопараметричних та двопараметричних точкових поліномів здійснюється шляхом застосування композиційних матриць (компоматриць), які є результатом оцифрування (параметризації) дискретного каркасу базисних точок геометричного об'єкту і являють собою прямокутні таблиці. Тобто, компоматриці враховують геометричні особливості форми вихідного каркасу точок. У компоматрицях можна замінювати окремі елементи – точки, не чіпаючи решти елементів. Позначаються компоматриці подвійними квадратними дужками:

$$\left[\left[A \right] \right]_l = \left[\left[A_i \right] \right]_{i=1, \overline{l}} - \text{однорозмірні компоматриці точкові};$$

$$\left[\left[a(t) \right] \right]_l = \left[\left[a_i(t) \right] \right]_{i=1, \overline{l}} - \text{однорозмірні компоматриці параметричні};$$

$$\left[\left[A \right] \right]_{l \times m} = \left[\left[A_{ij} \right] \right]_{i=1, \overline{l}; j=1, \overline{m}} - \text{двorozмірні компоматриці точкові};$$

$$\left[\left[a(U, V) \right] \right]_{l \times m} = \left[\left[a_{ij}(U, V) \right] \right]_{i=1, \overline{l}; j=1, \overline{m}} - \text{двorozмірні компоматриці параметричні}.$$

Наданий тут знак рівності вказує, що можна застосовувати обидва варіанти позначень як рівнозначні в залежності від тексту.

У дворозмірних компоматрицях точкових елементи – базисні точки обираються лише у місцях перетину ребер каркасу ліній поверхні. Індксація елементів компоматриць здійснюється у відповідності до номерів ребер каркасів ліній поверхні та може не збігатися з їхнім місцезнаходженням у самій компоматриці відносно її рядків і стовпців. Тобто, компоматриці упорядковуються у відповідності до каркасів ліній поверхонь за двома її параметричними напрямками. Виходячи з цього, операції над компоматрицями здійснюються через відповідні операції над їхніми елементами з однаковими індексами чи то одинарними, чи то подвійними.

Точкове БН-числення є аналогом векторного числення, у якому замість векторів оперують відношенням довжин відрізків. Метричний оператор трьох точок (МОТТ) у точковому БН-числення є аналогом скалярного добутку векторів векторного числення. За допомоги МОТТ будемо визначати довжини відрізків у координатному трипросторі. Однак, МОТТ використовується і у n -просторі. Позначається МОТТ: $\Sigma_{A_2 A_3}^{A_1}$ – читається: «сигма $A_2 A_3$ при вершині A_1 ». Якщо у долішньому індексі двічі записана одна і та сама літера $\Sigma_{A_2 A_2}^{A_1}$, то такий МОТТ дорівнює квадрату довжини відрізка $(A_1 A_2)$, тобто $\Sigma_{A_2 A_2}^{A_1} = (A_1 A_2)^2$. Для спрощення записів, у цьому випадку позначень, застосовуються лише індекси, а літера: "A" не записується $\Sigma_{ii}^{i-1} = (A_{i-1} A_i)^2$, тобто $A_{i-1} A_i = \sqrt{\Sigma_{ii}^{i-1}}$. Розкривається МОТТ у точковій формі наступним чином:

$\Sigma_{ii}^{i-1} = \Sigma(A_{i-1} A_i)(A_{i-1} A_i) = \Sigma(A_{i-1} A_i)^2$. Звідкіля у координатній формі для n -простору можемо визначити довжину відрізка $(A_{i-1} A_i) = \sqrt{(1_{i-1} - 1_i)^2 + (2_{i-1} - 2_i)^2 + (3_{i-1} - 3_i)^2 + \dots + (n_{i-1} - n_i)^2}$, де натуральними числами позначено номер координат n -простору точок A_{i-1} та A_i . Довжина відрізка визначено через МОТТ у трипросторі матиме наступний запис:

$$(A_{i-1} A_i) = \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2 + (z_{i-1} - z_i)^2}.$$

Мета дослідження

Із застосуванням композиційних матриць точкових і параметричних розробити і викласти, у загальному вигляді для n базисних точок, метод утворення однопараметричних та двопараметричних точкових поліномів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Рівняння точкових поліномів утворюються у параметричній формі як сума добутків базисних точок геометричної фігури на характеристичні функції, що складаються окремо для кожної точки геометричної фігури за результатами її параметризації. В результаті чого рівняння точкових поліномів є безвідносними щодо вихідної системи координат, а утворюються відносно базисних точок. Координатами точкових поліномів є значення характеристичних функцій для параметрів поточної точки.

Рівняння однопараметричного точкового поліному має наступний вигляд:

$$L = \sum_{i=1}^l A_i \cdot p_i(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (1)$$

де L – позначення поточної точки;

A_i – базисні точки вихідної дискретно поданої кривої;

$p_i(t)$ – характеристичні функції для кожної з базисних точок;

l – кількість складових (базисних точок) точкового поліному.

Характеристична функція утворюється у вигляді дроби, чисельник і знаменник якого являють собою добутки різниць параметрів, де зменшувані цих різниць є параметри усіх базисних точок кривої крім тієї, для якої утворюється ця характеристична функція, а від'ємниками є у чисельнику – поточний параметр, у знаменнику – параметр базисної точки, для якої утворюється ця характеристична функція.

Параметри t_i , для $i = \overline{1, l}$ базисних точок кривої визначаються за результатами її параметризації.

Виходячи зі сказаного, вираз характеристичних функцій у загальному запису для базисних точок кривої лінії матиме наступний вигляд:

$$p_{(i)}(t) = \frac{\prod_{\substack{i=1 \\ (i) \neq i}}^l (t_i - t)}{\prod_{\substack{i=1 \\ (i) \neq i}}^l (t_i - t_{(i)})}, \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (2)$$

де t – поточний параметр композиційної кривої;

t_i – значення параметрів у базисних точках дискретно поданої кривої;

$t_{(i)}$ – значення параметру у базисній точці, для якої утворюється характеристична функція;

$(i) \neq i$ – цей запис вказує, що використовуються усі значення параметрів, окрім того, індекс якого збігається з індексом базисної точки в дужках, для якої створюється характеристична функція.

Для знаходження значень параметрів t_i , для $i = \overline{1, l}$ у базисних точках дискретно поданої кривої A_i , $i = \overline{1, l}$, утворимо супровідну ламану лінію (СЛЛ), уздовж ланок якої будемо здійснювати параметризацію дискретно поданої кривої (ДПК). Позначимо довжину кожної із ланок СЛ через $\Delta_{i-1,i}$ для $i = \overline{2, l}$. Тоді, з використанням метричного оператора трьох точок (МОТТ), знайдемо модуль довжини кожної з ланок СЛЛ:

$$\Delta_{i-1,i} = \sqrt{\Sigma_{ii}^{i-1}}, \quad i = \overline{2, l}. \quad (3)$$

Тут у (3) нумерація індексів i починається із цифри “2” через те, що довжина першої ланки СЛЛ завжди дорівнює нулю, тобто $\Delta_{1,1} = 0$.

Визначимо сумарну довжину – $L_{l,1}$ усіх ланок супровідної ламаної лінії:

$$L_{l,1} = \sum_{i=2}^l \sqrt{\Sigma_{ii}^{i-1}} = \sum_{i=2}^l \Delta_{i-1,i}. \quad (4)$$

Враховуючи (3), (4) визначимо сукупність параметрів t_i , $i = \overline{1, l}$, для кожної з базисних точок A_i , $i = \overline{1, l}$:

$$t_i = \frac{\sum_{\tau=2}^{i-1} \Delta_{\tau, \tau-1}}{L_{l,1}}, \quad i = \overline{2, l}; \quad \tau = \overline{2, l}. \quad (5)$$

Підставляючи параметри (5) у (2), дістанемо вирази характеристичних функцій для кожної із базисних точок A_i , серед яких $t_1 = 0$; $t_l = 1$, а всі решта значень t_i для $i = \overline{2, l-1}$ мають значення $0 \leq t_i \leq 1$. При цьому, сума значень параметрів t_i в усіх базисних точках завжди дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^l p_i(t_i) = 1, \quad (6)$$

а поміж базисних точок – може відхилятися від одиниці, тобто:

$$\sum_{i=1}^l p_i(t) \neq 1. \quad (7)$$

Для того, щоби сума характеристичних функцій (7) дорівнювала одиниці і поміж базисних точок, необхідно їх гармонізувати, перетворивши кожну з них у Балюби-Найдиша координати (БН-координати), які позначимо $b_i(t)$, $i = \overline{1, l}$:

$$b_i(t) = \frac{p_i(t)}{\sum_{i=1}^l p_i(t)}, \quad i = \overline{1, l}, \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (8)$$

$$b_i(t) = \frac{p_i(t)}{\sum_{i=1}^l p_i(t)}, \quad i = \overline{1, l}, \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (8)$$

Враховуючи (8), негармонізований точковий поліном (1) перетвориться у гармонізований шляхом заміни в записах:

$$L = \sum_{i=1}^l A_i \cdot b_i(t), \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (9)$$

При цьому, у гармонізованого точкового поліному (9) сума БН-координат дорівнює одиниці і в базисних точках A_i , і поміж ними $\sum_{i=1}^l b_i(t) = 1$, а це означає, що БН-координати точкового поліному відповідають вимогам щодо простого відношення трьох точок, тобто являють собою і функціональні, і числові інваріанти паралельного проєктування. Таким чином, БН-координати гармонізованого однопараметричного точкового поліному (9) і у просторі, і на його проєкціях мають однаковий і запис, і значення для параметру поточної точки, отже їх вирази не потребують жодних перетворень під час паралельного проєктування точкового поліному чи то на осі проєкцій, чи то на площини проєкцій. А це надає значних переваг у проведенні аналізу композиційних кривих ліній, поданих у вигляді однопараметричних гармонізованих точкових поліномів.

Рівняння двопараметричного точкового поліному має наступний вигляд:

$$L_{lm} = \sum_{i,j=1}^{l,m} A_{(ij)} \cdot p_{ij}(U) \cdot q_{ij}(V), \quad 0 \leq U : V \leq 1, \quad (10)$$

де L_{lm} – позначення поточної точки на поверхні;

A_{ij} – базисні точки вихідної дискретно поданої поверхні;

$p_{ij}(U)$, $q_{ij}(V)$ – характеристичні функції для кожної з базисних точок за двома параметричними напрямками U та V ;

l, m – кількість базисних точок кожного з ребер каркасів ліній за параметричними напрямками U та V ;

$i : j$ – цей запис означає, що обидва індекси розпочинають свій відлік з одиниці;

$U : V$ – означає, що обидва поточні параметри знаходяться у визначених межах;

$ij \neq (ij)$ – цей запис означає, що утворювані обидві характеристичні функції використовують усі значення параметрів базисних точок окрім того, подвійний індекс якого збігається з подвійним індексом базисної точки, для якої ці характеристичні функції створюються.

Утворення характеристичних функцій $p_{ij}(U)$ та $q_{ij}(V)$ є аналогічним до утворення $p_i(t)$ із (1) та (2).

Параметри U_{ij} та V_{ij} , для $i = \overline{1, l}$; $j = \overline{1, m}$, у базисних точках A_{ij} , визначаються за результатами параметризації ребер каркасів ліній, відповідно, за параметричними напрямками U та V .

Виходячи із сказаного, вираз характеристичних функцій в узагальненому записі для усіх базисних точок каркасу ребер, за параметричним напрямком U , матиме наступний вигляд:

$$p_{(ij)}(U) = \frac{\prod_{i=1}^l (U_{ij} - U)}{\prod_{\substack{i=1 \\ (ij) \neq ij}}^l (U_{ij} - U_{(ij)})}, \quad j = \overline{1, m}, \quad 0 \leq U \leq 1, \quad \text{де} \quad (11)$$

U – поточний параметр за напрямком;

U_{ij} – значення параметрів в усіх, крім однієї, базисних точках;

$U_{(ij)}$ – значення параметру у базисній точці, для якої утворюється характеристична функція;

$ij \neq (ij)$ – цей запис вказує, що використовуються усі значення параметрів, крім того, подвійний індекс якого збігається з подвійним індексом базисної точки, в дужках, для якої створюється ця характеристична функція.

Аналогічно за параметричним напрямом V матимемо:

$$q_{(ij)}(V) = \frac{\prod_{\substack{j=1 \\ (ij) \neq ij}}^m (V_{ij} - V)}{\prod_{\substack{j=1 \\ (ij) \neq ij}}^m (V_{ij} - V_{(ij)})}, \quad i = \overline{1, l}, \quad 0 \leq V \leq 1. \quad (12)$$

У (12) позначення є аналогічними як і (11) тільки для напрямку V .

Аналогічно (3), (4), (5), за параметричним напрямом U , для кожного j -того ребра обчислимо значення параметрів в усіх його базисних точках – U_{ij} . Для кожного j -того ребра позначимо довжину кожної із ланок його СЛЛ через $\Delta_{i,i-1}^j$.

Модулі довжин:

$$\Delta_{i,i-1}^j = \sqrt{\Sigma_{ii}^{j-1}}, \quad i = \overline{2, l}, \quad j = \overline{1, m}.$$

Сумарна довжина:

$$L_{i,1}^j = \sum_{i=2}^l \Delta_{i,i-1}^j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (13)$$

Для кожної з базисних точок A_{ij} j -того ребра обчислимо значення параметрів за напрямом U :

$$U_{ij} = \frac{\sum_{\tau=2}^{w=i} \Delta_{\tau,\tau-1}^j}{L_{i,1}^j}, \quad i = \overline{2, l}; \quad \tau = \overline{2, l}. \quad (14)$$

Аналогічно (13), (14) за параметричним напрямом V , для кожного i -того ребра обчислимо значення параметрів V_{ij} у всіх його базисних точках A_{ij} . Для цього, для кожного i -того ребра позначимо довжину кожного із ланок його СЛЛ через $\Delta_{j,j-1}^i$.

Модулі довжин:

$$\Delta_{j,j-1}^i = \sqrt{\Sigma_{jj}^{i-1}}, \quad j = \overline{2, m}, \quad i = \overline{1, l}.$$

Сумарна довжина:

$$M_{m,1}^i = \sum_{j=2}^m \Delta_{j,j-1}^i, \quad i = \overline{1, l}. \quad (15)$$

Спираючись на (15), для кожної базисної точки A_{ij} i -того ребра, обчислюємо значення параметрів за параметричним напрямом V .

$$V_{ij} = \frac{\sum_{\tau=2}^{w=j} \Delta_{\tau,\tau-1}^i}{M_{m,1}^i}, \quad j = \overline{2, m}, \quad i = \overline{1, l}. \quad (16)$$

Підставляючи значення (14) в (11) і (16) у (12), а потім разом (11) і (12) в (10), дістанемо шуканий двопараметричний точковий поліном, який одним рівнянням композиційно інтерполює, за наперед визначеними точками, сегмент поверхні довільної форми.

Як бачимо, точковий поліном (10) містить доданки, які є добутками. Реалізацію операції множення характеристичних функцій між собою і двопараметричних характеристичних функцій на базисні точки найкраще здійснювати у компоматричній формі (композиційно-матричній формі):

$$\left[\left[p_{ij}(U) \right] \right]_{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}} \cdot \left[\left[q_{ij}(V) \right] \right]_{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}} = \left[\left[p_{ij}(U) \cdot q_{ij}(V) \right] \right]_{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}} = \left[\left[a_{ij}(U, V) \right] \right]_{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}}. \quad (17)$$

При цьому, у (17) елементи, що є добутками характеристичних функцій фізично перемножувати не потрібно. Застосоване позначення $a_{ij}(U, V)$ цього добутку необхідно сприймати як скорочення запису. Крім того, здійснюється множення елементів лише з однаковими подвійними індексами.

Усі елементи-добутки двопараметричної компоматриці (17) являють собою параметричний функціональний базис двопараметричного точкового поліному (10). Результатом

множення компоматриці точкової $[[A_{ij}]]$ на компоматрицю параметричну (10) є компоматриця геометричної фігури $[[L_\Phi]]$:

$$[[L_\Phi]] = \underset{l \times m}{[[A_{ij}]]} \cdot \underset{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}}{[[a_{ij}(U, V)]]} = \underset{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}}{[[A_{ij} \cdot a_{ij}(U, V)]]}, \quad 0 \leq U : V \leq 1. \quad (18)$$

У компоматриці поверхні (18) множення елементів A_{ij} та $a_{ij}(U, V)$ здійснюється лише між тими, у яких збігається подвійні індекси "ij".

Гармонізація двопараметричного точкового поліному (10) здійснюється через гармонізацію ребер каркасів ліній поверхні окремо за кожним із параметричних напрямів аналогічно (8):

$$b_{ij}(U) = \frac{p_{ij}(U)}{\sum_{i=1}^l p_{ij}(U)}, \quad j = \overline{1, m}, \quad 0 \leq U \leq 1. \quad (19)$$

$$b_{ij}(V) = \frac{p_{ij}(V)}{\sum_{j=1}^m p_{ij}(V)}, \quad i = \overline{1, l}, \quad 0 \leq V \leq 1. \quad (20)$$

$$\underset{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}}{[[b_{ij}(U)]]} \cdot \underset{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}}{[[q_{ij}(V)]]} = \underset{i=\overline{1,l}; j=\overline{1,m}}{[[b_{ij}(U, V)]]}. \quad (21)$$

Підставляючи в (10) елементи компоматриці (21), що є БН-координатами, дістанемо гармонізований двопараметричний точковий поліном:

$$L_m = \sum_{i,j=1}^{l,m} A_{ij} \cdot b_{ij}(U, V), \quad 0 \leq U : V \leq 1. \quad (22)$$

Зауважимо, що гармонізація двопараметричного точкового поліному за параметричними напрямими уздовж каркасів ліній (19), (20), (21) містить деяку похибку у порівнянні з суцільною його гармонізацією, однак є менш ресурсовитратною під час програмної реалізації.

Висновки

У цьому дослідженні запропоновано метод композиційної інтерполяції шляхом утворення характеристичних функцій, що являють собою функціональний базис однопараметричних та двопараметричних точкових поліномів. Точкові поліноми здатні одним рівнянням, без поділення вихідної геометричної фігури на сегменти, описувати дискретно подані геометричні об'єкти довільної форми, за наперед визначеними геометричними умовами, для будь-якої фінітної множини базисних точок. При цьому, навіть за наявних неконтрольованих точок перегину на графіку цього точкового поліному є відсутніми великі амплітуди коливань, які б спотворювали перебіг процесу, що описується цим точковим поліномом. На нашу думку, таке відбувається через те, що функціональний базис точкових поліномів, який складається із усіх його характеристичних функцій, утворюється виходячи із геометричних особливостей вихідного дискретно поданого геометричного об'єкту, враховуючи їх у повній мірі. Тобто, особливості геометричного об'єкту і функціональний базис точкового поліному, що аналітично описує цей об'єкт, знаходяться у повній злагоді. Тому, за наявних неконтрольованих точок перегину, на точковому поліномі не виникають коливань його форми з великими амплітудами, які б спотворювали форму вихідного геометричного об'єкту. І навпаки, у більшості традиційних методів поліноміальної інтерполяції функціональні базиси є бернштейнівськими, які існують самі по собі як окремі математичні об'єкти і ніяким чином не враховують геометричні особливості вихідного дискретного об'єкту, до інтерполяції якого їх застосовують. Через це виникають на інтерполянтах, побудованих традиційними методами поліноміальної інтерполяції, осциляція з великими амплітудами. Отже, розробка теорії точкових поліномів розв'язує багато проблем зв'язаних з обробкою і аналізом процесів з великими базами даних.

Список використаної літератури

1. Верещага В.М. Композиційне геометричне моделювання: Монографія. Мелітополь: ФОП Однорог Т.В., 2017, 108 с.
2. Адоньев Є.О. Композиційний метод геометричного моделювання багатofакторних систем: дис. ... д-ра техн. наук. К.: КНУБА, 2018, 512 с.
3. Верещага В.М. Лисенко К.Ю., Найдиш А.В., Адоньев Є.О. Основи композиційного геометричного моделювання: навчальний посібник. Мелітополь: ФОП Однорог Т.В., 2019, 255 с.
4. Балюба И.Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении: дис. ... доктора тех. наук. Макеевка: МИСИ, 1995. 227 с.
5. Балюба И.Г., Найдиш В.М. Точечное исчисление [учебное пособие]; под ред. Верещаги В.М. Мелітополь: Изд-во МГПУ им. Б.Хмельницького, 2015, 234 с.

References

1. Vereshchaha, V.M. (2017). Composite geometric modeling: Monograph. Melitopol: FOP Odnorog T.V.
2. Adonyev, E.O. (2018). Composite method of geometric modeling of multifactorial systems: dissertation. ... Dr. Tech. of science K.: KNUBA.
3. Vereshchaha, V.M., Lysenko, K.Yu., Naidysh, A.V., & Adonyev, E.O. (2019). Fundamentals of composite geometric modeling: a tutorial. Melitopol: FOP Odnorog T.V.
4. Baliuba, I.G. (1995). Constructive geometry of manifolds in point calculus: Cand. ... Dr. tech. Sciences. Makeevka: MISI.
5. Baliuba, I.G., & Naidysh, V.M. (2015). Point calculus [tutorial]; ed. Vereshchagi V.M. Melitopol: Publishing house of MGPU im. B. Khmel'nitsky.

Павленко Олександр Михайлович – к.т.н., доцент кафедри управління та адміністрування Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. E-mail: alexander8944@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8646-2622.

Муртазієв Ернест Гафарович – к.пед.н., доцент кафедри математики і фізики Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. E-mail: ernest_gaf@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2154-5523.

Верещага Віктор Михайлович – д.т.н., професор кафедри математики і фізики Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. E-mail: vervik1949@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0038-8300.

УДК 004.942: 616-71

М.Р. ПЕТРИК, І.Я. МУДРИК, М.В. БАЧИНСЬКИЙ, І.Я. СТАДНИК,
М.І. ПІДГУРСЬКИЙ, В.О. ЯМКО
Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

ВИСОКОПРОДУКТИВНІ МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АНОРМАЛЬНИХ РУХІВ ПІД ДІЄЮ ЗВОРОТНИХ КОГНІТИВНИХ ВПЛИВІВ

Нові методи моделювання використовуються для забезпечення підходу до проектування цифрових діагностичних систем здоров'я для пацієнтів із неврологічними захворюваннями. Актуальним завданням є створення нових програмно-апаратних рішень для медицини та автоматизованих діагностичних систем для ідентифікації нових явищ організму та здоров'я людини. Важливим є дослідження нейро-біо-систем зі feedback-зв'язком, пов'язаних з аналізом стану та поведінки T-об'єктів (пацієнтів з ознаками тремору) під когнітивним впливом нейронних вузлів кори головного мозку.

В сучасних умовах особлива увага приділяється новим цифровим системам діагностики та лікування в медичному застосуванні. Спроекована математична модель наномедичної системи орієнтована на визначення параметрів аномальних рухів пацієнтів із симптомами тремору (T-об'єктів), викликаних негативними впливами певного набору нервових вузлів кори головного мозку. Визначення параметрів цих впливів окреслить шляхи вирішення проблеми.

Авторами описано моделі сигналів, отриманих в якості вхідних даних для опрацювання (рисунок пацієнта тесту спіралі Архімеда), проаналізовано точність та ефективність методів комп'ютеризованого аналізу ступеню тремору. Описано основні результати моделювання, отримано частотні характеристики, амплітуди коливання, відхилення від норми та інші показники. Розроблено високоефективну інформаційну технологію для оцінки неврологічних рухів людини на основі гібридної моделі аналізу хвильового сигналу з урахуванням когнітивного зворотного зв'язку нейровузлів кори головного мозку.

З використанням гібридних перетворень Фур'є реалізовано швидкісне аналітичне рішення моделі у векторній формі, що дозволяє визначати елементи рухів на кожному відрізку складної спіральної траєкторії, що виконується пацієнтом за допомогою електронного пера на цифровому планшеті, та ідентифікували параметри досліджуваних нейросистем зі зворотним зв'язком.

Ключові слова: неврологічні рухи, тремор, математичне моделювання, когнітивні зворотні нейрозв'язки, аномальний рух, графічний планшет, електроенцефалограма, діагностика, гібридне перетворення Фур'є, апаратне та програмне забезпечення, комп'ютерне моделювання.

M. PETRYK, I. MUDRYK, M. BACHYNSKYI, I. STADNYK, M. PIDGURSKYI, V. YAMKO
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

HIGH-PRODUCT METHODS AND INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MODELING AND IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF ABNORMAL MOVEMENTS UNDER THE INFLUENCE OF REFUSED COGNITIVE INFLUENCES

New modeling techniques are used to provide an approach to the design of digital health diagnostic systems for patients with neurological diseases. An urgent task is the creation of new software and hardware solutions for medicine and automated diagnostic systems for identifying new phenomena of the body and human health. It is important to study neuro-bio-systems with feedback, related to the analysis of the state and behavior of T-objects (patients with signs of tremor) under the cognitive influence of neural nodes of the cerebral cortex.

In modern conditions, special attention is paid to new digital systems of diagnosis and treatment in medical applications. The designed mathematical model of the nanomedical system is focused on determining the parameters of abnormal movements of patients with tremor symptoms (T-objects), caused by the negative effects of a certain set of nerve nodes of the cerebral cortex. Determining the parameters of these influences will outline ways to solve the problem.

Authors described the models of the signals received as input data for processing (drawing of the patient of the Archimedes-spiral test), analyzed the accuracy and efficiency of the methods of computerized analysis of the degree of tremor. The main modeling results are described, frequency characteristics, oscillation amplitudes, deviations from the norm and other indicators are obtained. A highly effective information technology has been developed for the evaluation of neurological movements of a person based on a hybrid model of wave signal analysis taking into account the cognitive feedback of cerebral cortex neuronodes.

With the use of hybrid Fourier transformations, a fast analytical solution of the model in vector form was implemented, which allows determining the elements of movements on each segment of a complex spiral trajectory performed by the patient using an electronic pen on a digital tablet. , and identified the parameters of the studied neurosystems with feedback.

Keywords: neurological movements, tremor, mathematical modeling, cognitive feedback, abnormal movement, graphics tablet, electroencephalogram, diagnosis, Fourier-hybrid transform, hardware and software, computer simulation.

Постановка проблеми

У силу того, що наразі відсутні методи прогресивного та швидкого тестування та аналізу даних для діагностування захворювань на тремор, зацікавленість до систем даного типу зі сторони медичних закладів є досить високою. Також системи даного спрямування дають розширені можливості для оцінки отриманих результатів діагностики не тільки в межах даного захворювання, а й стану здоров'я пацієнта загалом.

З метою подання математичного розв'язку у формі реалізації процедури функціональної ідентифікації амплітудних компонентів і фазової швидкості поширення хвилі аномального невралгічного руху (АНР) як функції часу в рамках декомпозиції моделі з урахуванням умов, що відомі сліди (дані спостереження у формі цифрових даних АНР-рухів пацієнта) розв'язку для кожного сегмента з побудовою систем початково-крайових задач (мікромоделей) для послідовних сегментів кривої руху.

Аналіз стану досліджень проблеми аномальних неврологічних рухів

Новітні інформаційні технології та методи моделювання в розробці комп'ютерної діагностичної системи покращують вирішення проблеми лікування критичних захворювань у світі, особливо людей, уражених неврологічними захворюваннями, такими як аномальні неврологічні рухи (АНР) або тремтіння та їх екстремальні форми. у вигляді хвороб Альцгеймера, Паркінсона [1]. АНР - небажані коливальні рухи певної частини тіла (рук, органів мови, очних яблук), що виникають внаслідок мимовільного скорочення м'язів людини [2]. Ознаками порушень регуляції рухів людини є збільшення їх амплітуди, зміна частоти і форми коливань. Аналіз цих параметрів АНР має вирішальне значення для розуміння ролі дисфункції зворотного зв'язку (feedback) в нейронних вузлах кори головного мозку (КГМ) у процесах когнітивного контролю рухів людини та раннього виявлення нейромоторних розладів. Складність ідентифікації АНР полягає в недосконалості існуючих методів діагностики, їх низькій точності, а також у відсутності математичних і програмних засобів ідентифікації нервово-зворотного впливу КГМ-вузлів на їх поведінку [2]. Дослідження нейросистем, пов'язані з аналізом поведінки пацієнтів із симптомами тремору (Т-об'єкти), проводилися рядом дослідників, таких як Pullman S.L., Legrand A.-P., Vidailhet M. (ESPCI Paris Tech, ISEM CNRS), Ван Дж.-С., Луї Е., Хаубенбергер Д., Каловіц Д. та інші. [2-5]. Тут основну увагу було приділено аналізу параметрів відносно нормального стану та поведінки пацієнтів за допомогою класичних методів цифрової обробки на основі перетворення Фур'є [5-12]. Однак такі методи на сьогодні вже вичерпали себе і не дозволяють аналізувати аномальні стани зі складною, важкопрогнозованою поведінкою, яка притаманна реальним Т-об'єктам з високим ступенем тремору. Через недосконалість таких методів відбувається втрата 60-80% важливої інформації з опису реального стану пацієнтів, що де-факто зумовлює низьку якість такого аналізу.

Мета дослідження

Для конфігурації моделі ідентифікації використовували фрагменти траєкторії АНР спірального типу досліджуваного Т-об'єкта, здійснювану ним на цифровому графічному планшеті. Моделювання та ідентифікацію параметрів рухів АНР проводили в рамках завдання ідентифікації параметрів когнітивних feedback- впливів ЕЕГ-вектора сигналів КГР на сегменти траєкторії АНР, розробленого за допомогою гібридної моделі АНР. Для побудови ідентифікаційної моделі використовувався фрагмент сліду АНР досліджуваного Т-об'єкта, виконаний ним електронним пером на інтерактивному цифровому планшеті.

Метою даного дослідження є розробка гібридної аналітичної моделі, яка забезпечуватиме глибоку декомпозицію системи без порушення її цілісності та зв'язків, що не здійснюється класичними методами обробки сигналів, що приводять до втрати 60-80% інформації про реальний стан об'єкту. Методами машинного навчання необхідно попередньо уточнити вагові коефіцієнти впливу наборів цифрових записів сигналів когнітивних впливів нейровузлів кори головного мозку пацієнта у ході виконання ним тестових прикладів рисування спіральних траєкторій на цифровому планшеті.

Пропоновані підходи авторів до вирішення проблеми аналізу АНР під дією зворотних когнітивних впливів основного дослідження

Авторами запропоновано високопродуктивну інформаційну технологію дослідження АНР, побудовану на основі гібридної моделі аналізу сигналів нейросистеми, яка описує стан і поведінку 3D елементів траєкторій АНР Т-об'єкта з урахуванням когнітивні ефекти нервового зворотного зв'язку ідентифікованих вузлів КГМ з використанням комп'ютерного тестування рухів Т-об'єкта, що робить спроби відтворення шаблонних тестових траєкторій (у вигляді спіралі Архімеда та ін. тестів). За допомогою методів гібридних перетворень Фур'є побудовано швидкісні аналітичні розв'язки моделі аналізу АНР у вигляді векторних функцій, які визначають елементи тестових траєкторій рухів Т-об'єкта на кожному сегменті АНР [13-16]. На їх основі запропоновано високопродуктивні алгоритми ідентифікації параметрів АНР для покомпонентної оцінки ефектів нейро-зворотного зв'язку, які дозволяють розпаралелювати обчислення.

Спосіб збору даних АНР за допомогою графічного планшета. Якісне оцінювання характеристик АНР шляхом та кількісного покращення схем комп'ютерного тестування АНР вимагає знання точного положення електронного пера Т-об'єкта, що проходить тест на цифровому планшеті та тиску пера на поверхню планшета як функції часу впродовж усієї тривалості експерименту.

Для визначення координат X і Y , та Z як функцій часу цього необхідне використання графічного планшета зі спеціально адаптованим програмним забезпеченням, що забезпечує високу частоту і точність збору даних. З цих причин був обраний графічний планшет HUION KAMVAS PRO 16. Його активна зона (відповідає 345 x 194 мм) сумісна із загальноприйнятими моделями шкали оцінки тремору Фана-Толози-Маріна (FTRS) [4]. Рідер має роздільну здатність введення пера 5080 lpi, точність 0,25 мм і швидкість розпізнавання до 266 точок в секунду (згідно зі специфікаціями виробника). Крім того, даний планшет дозволяє відображати тиск пера під час малювання на площині та вимірювати рухи на відстані до 10 мм над поверхнею пера, що дозволяє візуалізувати рухи пацієнта в просторі та силу натиснення пера на поверхню планшета.

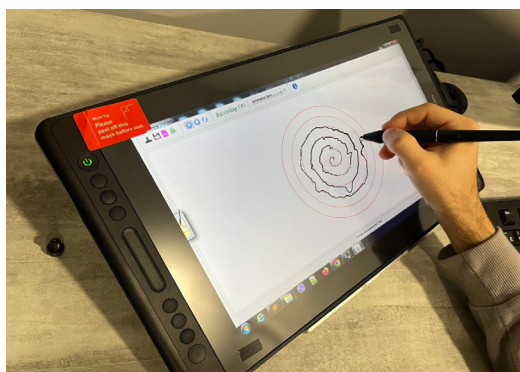


Рис 1. Візуальне представлення використання графічного планшета HUION KAMVAS PRO 16 в тесті

Для дослідження електроенцефалографічних (ЕЕГ) сигналів КГМ обрано комп'ютерний електроенцефалограф НЕЙРОКОМ – п'яте покоління розроблених комплексів

комп'ютерної електроенцефалографії. Енцефалограф в комплексі призначений для реєстрації, поглибленого аналізу та інтерпретації ЕЕГ і викликаних потенціалів (ВП), проведення різноманітних аналізів для наукових досліджень.

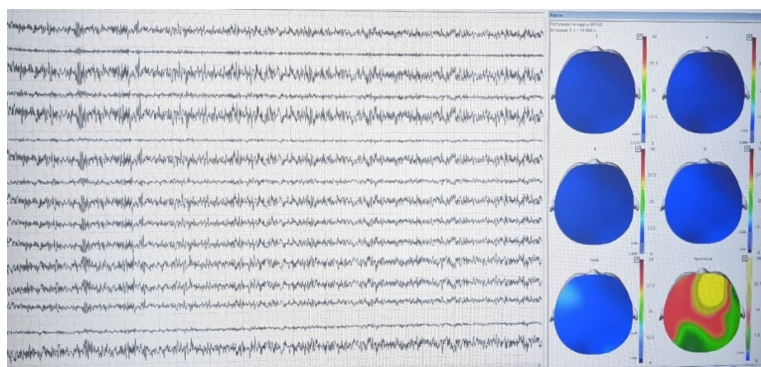


Рис 2. Візуальне представлення процесу збору даних від електроенцефалографічного комплексу NeuroCom

Шолом для аналізу когнітивних сигналів кори головного мозку із встановленою апаратно-програмною платформою виробника забезпечує 16-канальний відбір енцефалограм і передачу їх на персональний комп'ютер за відповідним протоколом. Програмне кондиціонування сигналів ЕЕГ і постобробка відбувається на ПК. Дані зберігаються як у необробленому тексті, так і у візуалізованому представленні в кожен момент часу. Дані зчитуються з кожного каналу відведення з інтервалом 2 мс (частота 500 Гц).

Гібридна модель забезпечує кількісні амплітудно-частотні характеристики АНР. Для врахування когнітивних feedback-впливів на поведінку АНР системи використовуються отримані цифрові набори індикаторів ЕЕГ-сигналів, які синхронно з рухом електронного пера Т-об'єкта надходять від 16-ти елементного вектора часових послідовностей сигналів, що поступають від ЕЕГ-сенсорів, встановлених на визначених на нейровузлах КГМ. Вектор ЕЕГ-сигналів в цілому визначають динаміку АНР для кожного j -го сегмента складної АНР-траси, де $j=1, n1$ – номер поточного сегмента АНР, $n1$ – кількість сегментів розбиття усєї траси АНР (рис. 4). У моделі розбиття може бути встановлено автоматично будь-яким способом, з будь-якою кінцевою кількістю сегментів. Їх довжина також може бути різною залежно від вибору рівня деталізації ділянок руху. Слід зауважити, що згідно концепції запропонованої гібридної моделі, когнітивні feedback-впливи вектор ЕЕГ-сигналів впливають тільки на поточні сегменти АНР-траси, що синхронізовані по часу проходження зі значеннями компонентів ЕЕ-вектора та обумовлюють визначену спадну еспоненціальну післядію на майбутні ділянки коливного руху (на пройдені ділянки руху ці впливи відсутні, що природньо).

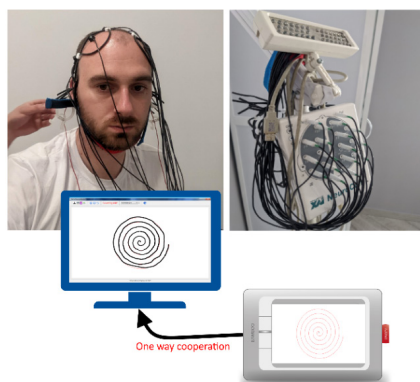


Рис 3. Ілюстрація використання дослідницького обладнання 3. Гібридна математична модель аналізу Т-об'єкта АНР з урахуванням когнітивних нейро-зворотних впливів вузлів КГМ

Гібридний модельний аналіз АНР, побудований на основі концепції поширення хвильового сигналу, визначає посегментний опис елементів траєкторій АНР з урахуванням матриці когнітивних feedback-впливів вектора сигналів нейровузлів КГМ на сегментах АНР [13]. В основі реалізації лежить метод визначення положення електронного пера, з допомогою якого Т-об'єкт відтворює траєкторію руху шаблону (спіралі Архімеда) на екрані інтерактивного планшета [14].

Visualisation de l'influence des composants du vecteur de neurosignaux $S(t)$ sur les éléments de MNA-trace $(l_{j-1}, l_j), j = 1, n_1$

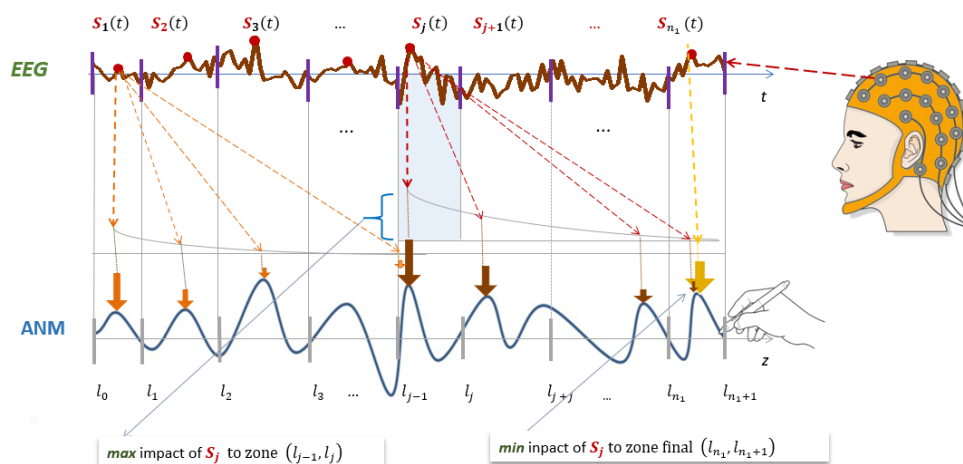


Рис. 4. Схематизація та візуалізація почасових когнітивних feedback-впливів компонентів вектора зв'язків EEG-сигналів нейровузлів КГМ на окремі елементи АНР-траси $(l_{j-1}, l_j), j = 1, n_1$ в рамках гібридної моделі АНР-аналізу

Відхилення траєкторії руху пера від шаблону має складну форму (рис. 4) і дає оцифровану інформацію для визначення неврологічного стану Т-об'єкта. Слід руху пера розбивається на простіші елементи з метою декомпозиції складних АНР-рухів у схематизації моделі. Кількість поділок залежно від складності зображення АНР можна вибрати довільно.

Опис математичної моделі функціональної ідентифікації АНР

Для представлення математичного розв'язку у вигляді реалізації процедури функціональної ідентифікації амплітудних складових і фазової швидкості розповсюдження хвилі АНР як функцій часу в рамках декомпозиції моделі, враховуючи умови, що відомі траси (дані спостереження у вигляді цифрових даних АНР-рухів Т-об'єкта) розв'язку для кожного k-го сегмента, отримана наступна система прямих початково-крайових задач (мікромоделей) для послідовних сегментів АНР [13]:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} u_k(t, z) = b_k^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} u_k + S_k^*(t, z) \quad (1)$$

з початковими умовами:

$$u_k(t, z)|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u_k}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad k = \overline{1, n_1 + 1} \quad (2)$$

Крайові умови на кожному з тонких сегментів АНР по z:

$$u_{k-1}(t, z)|_{z=l_{k-1}} = U_{l_{k-1}}, \quad u_k(t, z)|_{z=l_k} = U_{l_k}, \quad k = \overline{1, n_1 + 1} \quad (3)$$

Вибір функціонала-нев'язки. Вважаємо, що компоненти фазової швидкості поширення хвилі АНР $b_k, k = \overline{1, n_1 + 1}$ крайової задачі (3.3)-(3.5) є невідомими функціями від часу. При відомих значеннях положення пера $u_k(t, z)$ в точках спостереження на сегментах АНР $\gamma_k \subset \Omega_k, k = \overline{1, n_1 + 1}$:

$$u_k(t, z)|_{\gamma_k} = U_k(t, z)|_{\gamma_k}, \tag{4}$$

де початково-крайова задача (6.1)-(6.4) може бути розглянута для кожної точки z для кожного тонкого k_j -го сегмента ираси АНР і полягатиме в знаходженні функцій

$$b_k \in D, \text{ де } D = \left\{ v(t, z) : v|_{\Omega_{k,T}} \in C(\Omega_{k,T}), v > 0, k = \overline{1, n_1 + 1} \right\}.$$

Функціонал-нев'язка відхилення розв'язку від його слідів на $\gamma_{k_1} \in \Omega_{k_1}$, згідно [14] запишеться у вигляді:

$$J_k(b_k) = \frac{1}{2} \int_0^T \left(\|u_k(t, z, b_k) - U_k^*\|^2 \right) dt. \tag{5}$$

Методика розв'язання прямої крайової задачі ідентифікації. Побудова та математичне обґрунтування розв'язку задачі здійснюється шляхом використання скінченного інтегрального перетворення Фур'є. Застосувавши до задачі (6.1)-(6.4) інтегральні оператори [13]:

$$\begin{aligned} F[u_k(t, z)] &= \int_{l_{k-1}}^{l_k} u_k(t, z) V_m(\beta_m, z) dz \equiv U_{km}(t) \\ F^{-1}[U_{km}(t)] &= \sum_{m=0}^{\infty} U_{km}(t) \frac{V_m(\beta_m, z)}{\|V_m(\beta_m, z)\|^2} \equiv u_k(t, z) \end{aligned} \tag{6}$$

$$F\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} u_k(t, z)\right] = -\beta_m^2 U_{km}(t) + \beta_m U_{l_{k-1}} \left[1 - (-1)^m \frac{U_{l_k}}{U_{l_{k-1}}}\right] = -\beta_m^2 U_{km}(t) + \beta_m U_{l_{k-1}} - \beta_m (-1)^m U_{l_k}$$

$$V_k(\beta_m, z) = \sin \beta_m (z - l_{k-1}) \quad \beta_m = \frac{m\pi}{\Delta h} \quad \|V_k\|^2 = \int_{l_{k-1}}^{l_k} [V_k(\beta_m, z)]^2 dz = \frac{\Delta h}{2} \quad \sin \beta(l_k - l_{k-1}) = 0$$

Розв'язок задачі (6.1)-(6.4) після низки перетворень одержано у формі зручній і ефективній для числових ітераційних розрахунків для використання в процедурах ідентифікації параметрів:

$$u_k(t, z) = \frac{2}{\Delta l} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1 - \cos(b_k \beta_m t)}{\beta_m} \sin \beta_m (z - l_{k-1}) \left(S_k^* \frac{1}{(b_k \beta_m)^2} \left((-1)^m - 1 \right) + U_{l_{k-1}} \left(1 - (-1)^m \frac{U_{l_k}}{U_{l_{k-1}}} \right) \right) \tag{7}$$

Метод розв'язання спряженої крайової задачі АНР

У відповідності з вихідною прямою початково-крайовою задачею (1.1)-(1.5), слідуючи [14] для кожного наближення розв'язку, вводимо до розгляду спряжену часово-крайову задачу:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \phi_k(t, z) + b_k \frac{\partial^2}{\partial z^2} \phi_k(t, z) = (u_{k_k}^n - U_k^*)|_{z=\gamma_k} \delta(z - \gamma_k), \quad k = \overline{1, n_1 + 1} \tag{8}$$

$$\text{умовами при } t = T \quad \phi_k(t, z)|_{t=T} = 0 \tag{9}$$

та крайовими умовами першого роду для кожного наближення $D_{sp k}^n$, розв'язку:

$$\phi_k(t, z)|_{z=l_{k-1}} = 0; \quad \phi_k(t, z)|_{z=l_k} = 0, \tag{10}$$

Аналітичний розв'язок спряженої часово-крайової задач (6.10) -(6.10) отримуємо у вигляді [14]:

$$\phi_k(t, z) = \int_{l_{k-1}}^T \int_{l_{k-1}}^{l_k} \bar{\mathcal{H}}_k(t - \tau, z, \xi) (u_{k_k}^n - U_k^*)|_{z=\gamma_k} \delta(z - \gamma_k) d\xi d\tau, \tag{11}$$

де:

$$\bar{\mathcal{H}}_k(t - \tau, z, \xi) = \frac{2}{\Delta h} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\text{sh } b_k \beta_m (t - \tau)}{b_k \beta_m} \sin \beta_m (\xi - l_{k-1}) \sin \beta_m (z - l_{k-1}).$$

Розв'язок (11) спряженої задачі (8)-(9) після інтегрування і низки перетворень конвертуємо у формі зручній і ефективній для числових ітераційних розрахунків для використання в процедурах ідентифікації параметрів:

$$\phi_k(t, z) = \frac{2}{\Delta h} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1 - \text{ch}(b_k \beta_m (T - t))}{(b_k \beta_m)^2} \sin \beta_m \gamma_k \sin \beta_m (z - l_{k-1}) (U_k^* - u_{k_k}^n), \quad k = \overline{1, n_1 + 1} \quad (12)$$

Формули аналітичних виразів градієнтів функціонала-нев'язки

Вирази компонентів градієнтів функціонала-нев'язки для необхідних коефіцієнтів b_k :

$$\nabla J_{b_k} = \int_0^T \int_{l_{k-1}}^{l_k} \phi_k(t, z) \frac{\partial^2}{\partial z^2} u_k(t, z) dz dt \quad (13)$$

Для задач функціональної ідентифікації формули для компонентів градієнтів функціоналу невязки як функції від часу або координати, отримуємо, знімаючи відповідний інтеграл по t чи z у (13)

$$\nabla J_{b_k}(t) = \int_{l_{k-1}}^{l_k} \phi_k(t, z) \frac{\partial^2}{\partial z^2} u_k(t, z) dz, \quad (14)$$

$$\nabla J_{b_k}(z) = \int_0^T \phi_k(t, z) \frac{\partial^2}{\partial z^2} u_k(t, z) dt. \quad (15)$$

Тут подані точні аналітичні вирази компонентів підінтегральних виразів (14), (15):

$$\phi_k(t, z) = \frac{2}{\Delta h} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1 - \text{ch}(b_k \beta_m (T - t))}{(b_k \beta_m)^2} \sin \beta_m \gamma_k \sin \beta_m (z - l_{k-1}) (U_k^* - u_{k_k}^n), \quad k = \overline{1, n_1 + 1}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} u_k(t, z) = -\frac{2}{\Delta l} \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m (1 - \cos(b_k \beta_m t)) \sin \beta_m (z - l_{k-1}) \left(S_k^* \frac{1}{(b_k \beta_m)^2} ((-1)^m - 1) + U_{l_{k-1}} \left(1 - (-1)^m \frac{U_{l_k}}{U_{l_{k-1}}} \right) \right)$$

Регуляризаційні вирази для $n+1$ -го кроку визначення ідентифікуючої залежності. З використанням методу мінімальних похибок для визначення залежності функціональної ідентифікації компоненти амплітудного коефіцієнта коливного руху сигналу b_k^{n+1} як константу (параметр) на відрізьку або у вигляді функціональної залежності від часу t чи z , або від двох змінних для кожного k -го елемента АНР $k = \overline{1, n_1 + 1}$. Зокрема, для функціональної залежності від часу t маємо такий регуляризаційні вирази:

$$b_k^{n+1}(t) = b_k^n(t) - \nabla J_{b_k}^n(t) \frac{\|u_k(t, \gamma_k, b_k) - U_k^*\|^2}{\|\nabla J_{b_k}^n(t)\|_{\gamma_k}^2}, \quad t \in (0, T), \quad k = \overline{1, n_1}. \quad (16)$$

Матричний алгоритм ідентифікації вектора адаптивних коефіцієнтів впливу матриці когнітивних ЕЕГ сигналів на вектор сегментів траєкторії АНР

Формула зв'язку вектор сегментів траєкторії коливного руху електронного пера $[u_j(t)]$, $j = \overline{1, n+1}$ з матрицею матриці сигналів сенсорів ЕЕГ $[S_{ij}(t)]$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n+1}$, де m – кількість сенсорів ЕЕГ (в нашому випадку $m = 16$), $n+1$ – загальна кількість сегментів траєкторії руху пера вздовж координати z :

$$\begin{bmatrix} u_1(t, z) \\ u_2(t, z) \\ \dots \\ u_{n+1}(t, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & \dots & S_{1m}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & \dots & S_{2m}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n+1,1}(t) & S_{n+1,2}(t) & \dots & S_{n+1,m}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_m \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Звідси знаходимо:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & \dots & S_{1m}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & \dots & S_{2m}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n+1,1}(t) & S_{n+1,2}(t) & \dots & S_{n+1,m}(t) \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_1(t, z) \\ u_2(t, z) \\ \dots \\ u_{n+1}(t, z) \end{bmatrix},$$

Або:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & \dots & S_{1,n+1}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & \dots & S_{2,n+1}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m,1}(t) & S_{m,2}(t) & \dots & S_{m,n+1}(t) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_1(t, z) \\ u_2(t, z) \\ \dots \\ u_{n+1}(t, z) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Перемножуючи в правій частині (18) елементи матриць за правилами множення, отримуємо вектор значень коефіцієнтів адаптивного впливу $[S_{ij}(t)]$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n+1}$ на $[u_j(t)]$, $j = \overline{1, n+1}$:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{S}_{11}(t) \cdot u_1(t, z) + \tilde{S}_{12}(t) \cdot u_2(t, z) + \dots + \tilde{S}_{1,n+1}(t) \cdot u_{n+1}(t, z) \\ \tilde{S}_{21}(t) \cdot u_1(t, z) + \tilde{S}_{22}(t) \cdot u_2(t, z) + \dots + \tilde{S}_{2,n+1}(t) \cdot u_{n+1}(t, z) \\ \dots \\ \tilde{S}_{m,1}(t) \cdot u_1(t, z) + \tilde{S}_{m,2}(t) \cdot u_2(t, z) + \dots + \tilde{S}_{m,n+1}(t) \cdot u_{n+1}(t, z) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де $\tilde{S}_{ij}(t)$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n+1}$ - елементи оберненої матриці $(S^T)^{-1}$, індекс T - знак транспонування матриці.

Висновки

Інформаційну технологію розроблено на основі гібридної моделі АНР-аналізу нейро-системи, яка описує стан і поведінку Т-об'єктів з урахуванням когнітивних feedback- впливів КГМ. За допомогою методу гібридних перетворень Фур'є побудовано аналітичний розв'язок моделі у векторному вигляді, визначає елементи траєкторій на кожному сегменті АНР. На основі цього запропоновано високоефективні алгоритми ідентифікації параметрів досліджуван-них систем зворотного зв'язку. На відміну від загальноприйнятого класичного статистичного підходу обробки сигналів, запропонована гібридна модель орієнтована на глибоку декомпози-цію системи без порушення її цілісності та всіх важливих зв'язків. Крім того, завдання цього спостереження полягає в тому, щоб ретельно перевірити механізми та вдосконалити методи збору та аналізу даних, отриманих із спіральних малюнків пацієнта. Такий підхід дає можли-вість більш якісно описати складні приховані механізми АНР з великою кількістю внутрішніх зв'язків і когнітивних feedback- впливів КГМ, забезпечити високий ступінь повноти даних.

Список використаної літератури:

1. Electroencephalography complex NEUROKOM, NEUROLAB. Instructions for medical application AINC.941311.001 I1 U 33.1-02066769-001-2002.
2. Haubenberger D., Kalowitz D., Nahab F. B., Toro C., Ippolito D., Luckenbaugh D.A., Wittevrongel L., Hallett M. Validation of Digital Spiral Analysis as Outcome Parameter for Clinical Trials in Essential Tremor. *Movement Disorders*, 26 (11), 2073-2080, (2011).
3. Rajaraman V., Jack D., Adamovich S.V., Hening W., Sage J., Poizner H. A novel quantitative method for 3D measurement of Parkinsonian tremor. *Clinical neurophysiology*, 11(2), 187-369 (2000).
4. Legrand A.P., Rivals I., Richard A., Apartis E., Roze E., Vidailhet M., Meunier S., Hainque E. New insight in spiral drawing analysis methods – Application to action tremor quantification. *J Clinical Neurophysiology*, 128 (10), 1823–1834, (2017).
5. Wang J.-S., Chuang F.-C. An Accelerometer-Based Digital Pen with a Trajectory Recognition Algorithm for Handwritten Digit and Gesture Recognition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(7), 2998-3007 (2012).
6. Louis E. D., Gillman A., Böschung S., Hess C. W., Yu Q., Pullman S. L. High width variability during spiral drawing: Further evidence of cerebellar dysfunction in essential tremor. *Cerebellum*, 11, 872-879 (2012).

7. Xie H., Wang Z. Mean frequency derived via Huang-Hilbert transform with application to fatigue EMG signal analysis. *Comput Meth Progr Biomed*, 2006; 82:114–20.
8. Bhidayasiri R., Mari Z. Digital phenotyping in Parkinson's disease: Empowering neurologists for measurement-based care. *Parkinsonism Relat Disord*. 2020 Nov;80:35-40. DOI: 10.1016/j.parkreldis.2020.08.038, (2020).
9. Viviani P., Burkhard P.R., Chiuvé S.C., dell'Acqua C.C., Vindras P. Velocity control in Parkinson's disease: a quantitative analysis of isochrony in scribbling movements. *Exp Brain* 2009;194:259–83, (2009)
10. Salarian A., Russmann H., Wider C., Burkhard P.R., Vingerhoets F.J., Aminian K. Quantification of tremor and bradykinesia in Parkinson's disease using a novel ambulatory monitoring system, *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 54. Jg., Nr. 2, pp. 313- 22, (2007).
11. Lo G., Suresh A. R., Stocco L., González-Valenzuela S., and Leung V. C. A wireless sensor system for motion analysis of Parkinson's disease patients, (PERCOM Workshops), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 372-375, (2011).
12. Petryk M., Gancarczyk T., Khimich O. Methods of Mathematical Modeling and Identification of Complex Processes and Systems on the basis of High-performance Calculations (neuro- and nanoporous feedback cyber systems, models with sparse structure data, parallel computations). Scientific Publishing University of Bielsko-Biala.:Bielsko-Biała, Polska), (2021), 194 p.
13. Khimich A.N., Petryk M.R., Mykhalyk D.N., Boyko I.V., Popov A.V., Sydoruk. V.A. Methods for mathematical modeling and identification of complex processes and systems based on visoproductive computing (neuro- and nanoporous cyber-physical systems with feedback, models with sparse structure data, parallel computing). Monograph, Kiev: National Academy of Sciences of Ukraine. Glushkov Institute of Cybernetics. 2019. - 176 p. ISBN: 978-966-02-9188-1, (2019).
14. Mudryk I., Petryk M. Hybrid artificial intelligence systems for complex neural network analysis of abnormal neurological movements with multiple cognitive signal nodes. 2020 IEEE Third International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP) : Conference, Lviv, 21-25 August 2020. P. 108–111, (2020).

References

1. Electroencephalography complex NEUROKOM, NEUROLAB. Instructions for medical application AINC.941311.001 II U 33.1-02066769-001-2002.
2. Haubenberger, D., Kalowitz, D., Nahab, F. B., Toro, C., Ippolito, D., Luckenbaugh, D.A., Wittevrangel, L., & Hallett, M. (2011). Validation of Digital Spiral Analysis as Outcome Parameter for Clinical Trials in Essential Tremor. *Movement Disorders*, **26** (11), 2073-2080.
3. Rajaraman, V., Jack, D., Adamovich, S.V., Hening, W., Sage, J., & Poizner, H. (2000). A novel quantitative method for 3D measurement of Parkinsonian tremor. *Clinical neurophysiology*, **11** (2), 187-369.
4. Legrand, A.P., Rivals, I., Richard, A., Apartis, E., Roze, E., Vidailhet, M., Meunier, S., & Hainque, E. (2017). New insight in spiral drawing analysis methods. Application to action tremor quantification. *J Clinical Neurophysiology*, **128** (10), 1823–1834.
5. Wang, J.-S., & Chuang, F.-C. (2012). An Accelerometer-Based Digital Pen with a Trajectory Recognition Algorithm for Handwritten Digit and Gesture Recognition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59** (7), 2998-3007.
6. Louis, E. D., Gillman, A., Böschung, S., Hess, C. W., Yu, Q., & Pullman, S. L. (2012). High width variability during spiral drawing: Further evidence of cerebellar dysfunction in essential tremor. *Cerebellum*, **11**, 872-879.
7. Xie, H., & Wang, Z. (2006). Mean frequency derived via Huang-Hilbert transform with application to fatigue EMG signal analysis. *Comput Meth Progr Biomed*; 82:114–20

8. Bhidayasiri, R., & Mari, Z. (2020). Digital phenotyping in Parkinson's disease: Empowering neurologists for measurement-based care. *Parkinsonism Relat Disord.* 2020 Nov; 80:35-40. DOI: 10.1016/j.parkreldis.2020.08.038.
9. Viviani, P., Burkhard, P.R., Chiuvé, S.C., dell'Acqua, C.C., & Vindras, P. (2009). Velocity control in Parkinson's disease: a quantitative analysis of isochrony in scribbling movements. *Exp Brain* 2009;194:259–83.
10. Salarian, A., Russmann, H., Wider, C., Burkhard, P.R., Vingerhoets, F.J., & Aminian, K. (2007). Quantification of tremor and bradykinesia in Parkinson's disease using a novel ambulatory monitoring system, *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 54. Jg., (2), 313-322.
11. Lo, G., Suresh, A. R., Stocco, L., González-Valenzuela, S., & Leung V. C. (2011). A wireless sensor system for motion analysis of Parkinson's disease patients, (PERCOM Workshops), *2011 IEEE International Conference on. IEEE*, 372-375.
12. Petryk, M., Gancarczyk, T., & Khimich, O. (2021). *Methods of Mathematical Modeling and Identification of Complex Processes and Systems on the basis of High-performance Calculations (neuro- and nanoporous feedback cyber systems, models with sparse structure data, parallel computations)*. Scientific Publishing University of Bielsko-Biala.:Bielsko-Biała, Polska.
13. Khimich, A.N., Petryk, M.R., Mykhalyk, D.N., Boyko, I.V., Popov, A.V., & Sydoruk, V.A. (2019). *Methods for mathematical modeling and identification of complex processes and systems based on visoproductive computing (neuro- and nanoporous cyber-physical systems with feedback, models with sparse structure data, parallel computing)*. Monograph, Kiev: National Academy of Sciences of Ukraine. Glushkov Institute of Cybernetics.
14. Mudryk, I., & Petryk, M. (2020). Hybrid artificial intelligence systems for complex neural network analysis of abnormal neurological movements with multiple cognitive signal nodes. *2020 IEEE Third International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP) : Conference, Lviv, 21-25 August 2020*, 108–111.

Петрик Михайло Романович – д.ф.-м.н., професор кафедри програмної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: Mykhaylo_petryk@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6612-7213.

Мудрик Іван Ярославович – PhD, старший викладач кафедри програмної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: ilmudryk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4305-1911.

Бачинський Михайло Володимирович – к.т.н., доцент кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: m.bachynskyy@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4139-7633.

Стадник Ігор Ярославович – д.т.н., проф. кафедри обладнання харчових технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: igorstadnykk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4126-3256.

Підгурський Микола Іванович – д.т.н., проф. кафедри будівельної механіки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: kaf_zv@tu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8831-4810.

Ямко Владислав Олексійович - студент кафедри програмної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, спеціальність 121 – інженерія програмного забезпечення, e-mail: vebleb01@gmail.com .

G.M. SMAKOVSKA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

OPTIMAL TECHNOLOGIES OF AWNING STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS CHARACTERISTICS OF THE PARAMETERS

The work deals with the issue of computer modeling and some physical properties of modeled objects. Issues related to membrane awning structures, which are relevant nowadays, are also considered. Geometric modeling is considered as a direction of mathematical modeling, which includes the description of geometric images and the execution of certain operations on them in two-dimensional, three-dimensional or multidimensional space. The requirements for design tools and solving the problem of finding the optimal cutting of structural materials for the production of technical objects are analyzed. The characteristics of awning structures, the possibilities of forming, the use of various materials and the combined options of combining the awning with other materials are considered. The use of awning structures makes it possible to create not only small architectural forms, quickly assembled mobile structures that are easily transformed according to the change of functional purpose, but also to form new types of objects. Modern technologies combine the advantages of industrial construction methods with the individualization of the form, opening the way to the use of awning structures. Membrane coverings, as one of the modern trends in presenting a new form of roofing, create new spatial characteristics of architectural objects. Therefore, in order to solve the theoretical problems of calculating a high-quality awning structure, it is necessary to use special methods based on the use of the equilibrium state of membranes. Providing a wide variety of forms, this type of coating has wide prospects for use on a par with other architectural and structural systems. Ukraine has potential opportunities for the use of awning structures in the design of original objects. An informational model of commensuration of architectural form elements established on the basis of informational modularity of ratios of dimensional structure elements is proposed. The practical value of the method lies in the possibility of direct design of the awning surface, in contrast to other known methods, which proceed from rigid boundary conditions.

Key words: computer modeling; tent construction; surface; spatial membranes.

Г.М. СМАКОВСЬКА

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"

ОПТИМАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕНТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ РІЗНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРІВ

У роботі розглянуто питання комп'ютерного моделювання та деякі фізичні властивості модельованих об'єктів. Також розглядаються питання, пов'язані з мембранними тентовими конструкціями, які є актуальними в наш час. Геометричне моделювання розглядається як напрямок математичного моделювання, що включає опис геометричних образів і виконання над ними певних операцій у двовимірному, тривимірному або багатовимірному просторі. Проаналізовано вимоги до засобів проектування та вирішення задачі пошуку оптимального розкрою конструкційних матеріалів для виготовлення технічних об'єктів. Розглянуто характеристики тентових споруд, можливості формоутворення, застосування різноманітних матеріалів та комбінованих варіантів поєднання тенту з іншими матеріалами. Застосування тентових конструкцій дає можливість створювати не лише малі архітектурні форми, швидкозбірні мобільні споруди, які легко трансформуються відповідно до зміни функціонального призначення, а й формувати нові типи об'єктів. Сучасні технології поєднують переваги індустріальних методів будівництва з індивідуалізацією форми, відкриваючи шлях до використання тентових конструкцій. Мембранні покриття, як один із сучасних напрямків представлення нової форми покрівлі, створюють нові просторові характеристики архітектурних об'єктів. Тому, щоб вирішити теоретичні задачі розрахунку якісної тентової конструкції необхідне застосування спеціальних методів, що ґрунтуються на використанні рівноважного стану мембран. Забезпечуючи широке розмаїття форм, цей вид покриття має широкі перспективи використання на рівні з іншими архітектурно-конструктивними системами. Україна має потенційні можливості застосування тентових структур при проектуванні оригінальних об'єктів. Запропоновано інформаційну модель співвідношень елементів архітектурної форми, що встановлюється на підставі інформаційної модульності співвідношень елементів розмірної структури. Практична цінність методу полягає в можливості прямого проектування поверхні тенту на відміну від інших відомих методів, які виходять з жорстких граничних умов.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання; тентова конструкція; поверхня; просторові мембрани.

Formulation of the problem

Analysis of the latest research and publications by domestic and foreign scientists showed that technical means are becoming more complicated, and construction materials remain standard. This leads to new requirements for design tools, which must solve the task of finding the optimal cutting of structural materials for the production of technical objects [1]. However, despite the availability of a large number of scientific works on this problem, from the point of view of graphic training of future engineers and technicians, this category is insufficiently studied.

Geometric modeling is considered as a direction of mathematical modeling, which includes the description of geometric images and the execution of certain operations on them in two-dimensional, three-dimensional or multidimensional space [2]. The theoretical basis of geometric modeling is differential and analytical geometry, topology and sections of computational mathematics. Geometric modeling studies methods of constructing curved lines, surfaces and bodies, methods of performing various operations on them, and methods of controlling numerical models [3,4].

Recently, light, cost-effective awning structures have become more and more popular. They belong to the class of soft shells. Such constructive systems are spatial membranes with zero bending stiffness, which consist of complex surfaces of double curvature. These coatings can resist only in tension. Therefore, their perspective is obvious due to the presence of a whole set of positive properties in them, which favorably distinguishes awning structures from traditional ones, such as metal, reinforced concrete, etc. Such properties include: mobility, multi-functionality, lightness, a short period of construction (erection) and dismantling, as well as an expressive, attractive and modern appearance. For choosing design solutions, an important factor is the service life of awning structures, as well as its cost. The term of use depends on the choice of fabric for the shell. The fabric itself has different strength and elasticity in all directions of load application. Therefore, for stressed structures, materials with low creep will be better, because the previous stress can be lost if the fabric is stretched or deformed [5].

The processes of geometric modeling and engineering analysis of similar structures have their own specifics. In contrast to traditional structures under given boundary conditions, the shape of a stretched fabric surface of negative Gaussian curvature is unknown at the very beginning, and can only be calculated using appropriate methods. Another difference is that, due to their specificity, surfaces of double curvature, unlike linear surfaces, are reflected on a flat area only approximately. This complicates the construction of their cutting maps. The awning surface has a number of undesirable properties, such as the presence of "dead" zones, uneven load distribution, stress concentration in individual points, etc.

Thus, the factors that provide a wide variety of positive properties of soft shells are at the same time the reasons that significantly complicate the process of analysis and design of awning structures. Therefore, in order to solve the theoretical problems of calculating a high-quality awning structure, it is necessary to use special methods based on the use of the equilibrium state of membranes.

Main results

The current computer-aided design systems are difficult to imagine without the widespread use of graphical tools. This is due to the fact that geometric models not only visually process objects and processes, which allows the simplest way to achieve the desired results of their optimization, but also serve as the basis for coordinating mathematical and other descriptions of various industrial products.

Some programs, such as KOMPAS and others, include specialized modules for solving specific problems, namely, for building sweeps of technical forms for industry. In our country, the peak of development of tent construction falls on the mid-90s. For a long time, the development of awning structures was held back due to the inconsistency of domestic awning materials with the high requirements for structures of this type, such as light resistance, strength, variety of colors and durability. Now there is a stormy interest in architectural structures made of fabric, which is

due to the need of modern society for these structures. The service life of structures is an important factor in the choice of solutions, manufacturing features and cost of an architectural fabric structure. The service life is more dependent on the choice of fabric for the shell. The fabric is a non-uniform material in different directions and has different strength and elasticity in all directions of load application. Table 1 summarizes the comparative properties of the materials. When assessing the cost, the cheapest material has the highest value. All of these materials are composites.

Tabl. 1

Fabric type	Strength	Fire resistance	Durability	Cost	Typical use	Term of service	Remark
Composite polyester with PVC coating	5	3	3	4	Temporary, long term	3-15 years	A large selection of products, resistance to UV radiation and fire resistance
Glass fabric with PVC coating	4	4	3	3	From temporary to permanent	5-15 years	Available in limited quantities
Fiberglass with Teflon coating	4	5	5	1	Permanent	25 years or more	The most durable material
Fiberglass fabric with silicone coating	3	5	4	2	From long-term to permanent	20 years	Low strength of seams was found
Multi-layer material based on fiberglass with Teflon coating	3	5	5	1	From long-term to permanent	20 years	Relatively new material

The strength of the material is provided by a mesh fabric base, which is sealed and protected by a coating or film. Plastic, PVC and polyester materials are prone to degradation under the influence of UV radiation, while fiberglass and fiberglass mesh degrade with prolonged contact with moisture.

The two main methods of attaching the fabric sheath to the anchoring devices are with ceramic cable or with clamps. Some shell designs use both methods of attachment. Inflatables sometimes have cuffs and cables with a panel that covers the fabric and extends beyond the cable. Tensile structures are usually made to order, while anchoring and connecting devices are also made to order. However, basic products such as clamping devices have become more standardized. Some materials of the frame and connecting devices were borrowed from other industries, such as space frames and marine equipment.

When determining the appropriate design aesthetics, the following aspects are taken into account:

- 1) Tensile structures are flexible, and their elements must be designed for deflection under load;
- 2) Tensile structures weigh many times less than other buildings, and most of the materials used are translucent;
- 3) lateral forces in tensile structures play a greater role than in conventional building structures;
- 4) It should be ensured that the physical decomposition of the force vector (direction angle and magnitude) on each element is accurate.
- 5) The details, material specifications and reaction forces acting on the connected members of the structure shall be developed in consultation with an engineer or representative of the design firm or manufacturing firm capable of designing such structures.

In recent years, the construction design of fabric structures has been improved due to the widespread use of computer technology. The first stage of the design process using computer modeling is to determine the acceptable geometry of the shell surface. Then a mesh model of the shell is developed. This graphic model is prestressed. The reaction of the shell is analyzed by the interval method or by the method of repetitions. Real loads are checked on the model (wind load, load during

rain and snowfall), and stresses are calculated for the purpose of choosing the fabric and design of the supports and base.

Applications of fabric structures include short-lived and temporary frame-fabric structures used in agriculture for the construction of greenhouses, greenhouses, and storage facilities. Improved materials have allowed these structures to be used for garbage and waste treatment facilities, tennis courts and swimming pools. More sophisticated structures with complex geometry are used for outdoor concert and sports halls, as well as larger structures such as administrative buildings, medical institutions, shopping malls and airports. Fabric structures do not replace traditional structures, but their unique qualities allow them to perform certain building functions very efficiently. With the use of elastic membranes, the surface of the roof is visually perceived as a finish and part of the architecture at the same time. The shape of the roof in this case is an integral part of the architectural style. That is why the quality of its surface, its ability to self-clean, its immunity to pollution and the influence of environmental factors, as well as the process of wear and tear over time are essential factors when choosing architectural solutions for a particular house or structure.

There is no generally accepted classification of architectural structures made of fabrics, so one of the versions is considered. Of course, in practice there are also various combinations of the proposed classification, as well as the harmonious integration of fabric with other materials (glass, concrete, brick, etc.) in order to create an original image of the building and at the same time reduce its cost (Tabl. 2).

Tabl. 2

In the presence/ absence of a frame	Frame	steel, aluminum, concrete, wood, pneumatic frame, composite
	Cable	a system of supports and tension elements
	Frameless	air-filled
By degree of seasonality	Summer	
	year-round	
By degree of mobility	Stationary	
	Transformed	
	Mobile	
By overall dimensions	large awning structures	hotels, shopping centers, exhibition centers, summer cinemas, playgrounds, air-support structures, hockey rinks, tennis courts, train station and airport terminals, warehouses for storing materials and equipment, hangars
	medium awning structures	pavilions, tents, cafes, canopies
	light awning structures	textile facades, interior elements (stretch ceilings, partitions, furniture)

Conclusions

In global practice, the range of application of architectural structures made of fabrics has significantly expanded, thanks to the increase in the quality of the materials used (both coatings and load-bearing frames). In addition, it becomes possible to solve such urgent problems as alternative energy sources, energy saving and air purification of premises from pollutants. The topic of using architectural structures made of fabrics in Ukraine is not yet sufficiently developed. The trend of slowing down in the development of awning construction should be eliminated, it is necessary to revise the attitude towards similar structures taking into account local conditions, these structures should be introduced into the architecture and design of Ukraine.

Список використаної літератури

1. Панкова Л. А. Способи створення універсального інструментарію для комп'ютерного моделювання. *Проблеми управління*. 2006. 6. С. 2-5.

2. Райковська Г. Геометричне моделювання – основа конструкторськотехнологічних здібностей. *Нова пед. думка: науково-методичний журнал*. 2013. 1. 2. С. 68-70.
3. Пилюгин В.В. Модель як ключове поняття геометро-графічної підготовки. *Математичне моделювання*. 1994. 6. 5. С. 21–36.
4. Gale S., Lewis W. J. Patterning of tensile fabric structures with a discrete element model using dynamic relaxation. *Comp's and Structures*. 2016. 169. P. 112-121.
5. Хайруллин А.А. Легкие тентовые конструкции в организации городской среды. *Дизайн-ревью*. 1999. 2.

References

1. Pankova, L. A. (2006). Spособy stvorennia universalnoho instrumentariiu dlia kompiuternoho modeliuвання. *Problemy upravlinnia*. 6, 2-5.
2. Raikovska, H. (2013). Heometrychne modeliuвання – osnova konstruktorskotekhnolohichnykh zdibnostei. *Nova ped. dumka: naukovo-metodychnyi zhurnal*. 1 (2), 68-70.
3. Pyliuhyn, V.V. (1994). Model yak kliuchove poniattia heometro-hrafichnoi pidhotovky. *Matematychnе modeliuвання*. 6 (5), 21–36.
4. Gale, S., & Lewis, W. J. (2016). Patterning of tensile fabric structures with a discrete element model using dynamic relaxation. *Comps and Structures*. 169, 112-121.
5. Khairullyn, A.A. (1999). Lehkye tentovye konstruktsyy v orhanyzatsyy horodskoi sred *Dyzain-reviu*. 2.

Смаковська Ганна Миколаївна – аспірантка кафедри цифрових технологій в енергетиці, Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», e-mail: anna-07@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3900-4431.

Н.О. СОКОЛОВА, В.В.ГНАТУШЕНКО, М.С. МІЩЕНКО, О.А. АТАМАНЧУК
 Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ НЕІГРОВИХ ПЕРСОНАЖІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Комп'ютерні та відео-ігри – один з найбільших сегментів індустрії розваг, який стрімко розвивається у останні роки. Навіть пандемія пішла на користь цій галузі. Різноманіття ігор вражає, користувачі бажають отримувати якісний різноманітний контент, важливою частиною якого є неігрові персонажі.

Неігровий персонаж – це персонаж, керований програмою або майстром. Неігрові персонажі (доброзичливі або ворожі до гравця) слугують важливим засобом створення ігрової атмосфери, вони мотивують гравців робити ті чи інші дії, є основним джерелом інформації про ігровий світ та сюжет гри. Моделювання дій неігрових персонажів є важливою задачею при розробці ігор для покращення якості гри та більшого задоволення гравців. В сучасній розробці ігор для вирішення цієї задачі використовують алгоритми штучного інтелекту (ШІ), в тому числі машинне навчання, наприклад, для створення «розумних» ботів, які будуть боротися із гравцем. Ігровий ШІ не здатний на мислення чи творчість, його дії зумовлені розробниками, він підлаштовується під ситуацію та змінює поведінку залежно від контексту. Основними підходами у розробці поведінки неігрових персонажів є створення на фундаменті базових концепцій ШІ власних рішень для моделювання поведінки персонажів.

Дана робота присвячена моделюванню поведінки неігрових персонажів з використанням алгоритмів штучного інтелекту, зокрема дерева поведінки та алгоритму A^ пошуку. Дерево поведінки дозволяє неігровому персонажу приймати рішення в залежності від стану середовища та реагувати на його зміни. Переміщення є важливою частиною поведінки неігрових персонажів, які найчастіше некеровані гравцем, але часто логіка гри вимагає переміщення найкоротшим маршрутом задля динаміки гри. Проведена інтеграція змодельованої поведінки у вже існуючі вільні моделі ігрового рушія Unity, доведена коректна робота пошуку найкоротшого шляху за алгоритмом A^* , враховуючи різні кейси оточуючого середовища та самого персонажу, а також працездатність системи навігації між сценами. Розроблені моделі поведінки можна у подальшому або інтегрувати у вже існуючі моделі, або використати при створенні нових ігор та персонажів.*

Ключові слова: розробка ігор, неігрові персонажі, моделювання поведінки, штучний інтелект, дерева поведінки, пошук найкоротшого шляху.

N.O.SOKOLOVA, V.V. HNATUSHENKO, M.S. MISHCHENKO, O.A. ATAMANCHUK
 Dnipro University of Technology

MODELING THE BEHAVIOR OF NON-PLAY CHARACTERS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Computer and video games are one of the largest segments of the entertainment industry, which has been developing rapidly in recent years. Even the pandemic benefited this industry. The variety of games is impressive, users want to get high-quality diverse content, an important part of which are non-game characters.

A Non-Player Character is a character controlled by a program or wizard. Non-Player Characters (friendly or hostile to the player) serve as an important means of creating a game atmosphere, they motivate players to take certain actions, and are the main source of information about the game world and the plot of the game. Modeling the actions of Non-Player Characters is an important task in game development to improve game quality and enhance player satisfaction. In modern game development, artificial intelligence algorithms are used to solve this problem, including machine learning, for example, to create «smart» bots that will fight with the player. Game AI is not capable of thinking or creativity, its actions are determined by developers, it adapts to the situation and changes behavior depending on the context. The main approaches in the development of the behavior of non-game characters are the creation of own solutions for modeling the behavior of characters based on the basic concepts of AI.

This work is devoted to modeling the behavior of Non-Player Character using artificial intelligence algorithms, in particular the Behavior Tree and the A^ search algorithm. A Behavior Tree allows a Non-Player Character to make decisions depending on the state of the environment and react to its changes. Movement is an important part of the behavior of Non-Player Characters, which are often not controlled by the player, but often game logic requires movement by the shortest route for the sake of game dynamics. The integration of the simulated behavior into the already existing free models of the Unity game engine was carried out, the correct work of finding the shortest path according to the A^* algorithm, taking into account various cases of the environment and the character itself, as well as the functionality of the navigation system between scenes was proven. The developed behavior models can be further integrated into existing models or used in the creation of new games and characters.*

Keywords: game development, Non-Player Character, behavior modeling, artificial intelligence, Behavior Tree, shortest path search.

Постановка проблеми

Створення ігор – один із найбільших сегментів індустрії розваг, масштаби якого можна порівняти з кіноіндустрією. А за швидкістю зростання за останні п'ять років індустрія ігор суттєво її випереджала. У 2020 році за оцінками Google світовий ринок ігор зріс на 23,1% – це був найвищий показник за десятиліття і був оцінений у \$177,8 млрд, очікувалося, що до 2024 року ринок досягне \$218,7 млрд, при цьому середньорічний темп зростання становитиме 9,64% [1]. За даними британського видання Games Industry у 2022-му ринок оцінювався у \$184,4 млрд [2]. За рік цей показник впав на 4,3%. Найбільше прибутку генерують мобільні ігри (50%). За ними йдуть консольні (28%), завантажувані чи фізичні ПК-ігри (21%) та браузерні ПК-ігри (1%). 94,2% продажів ігор були цифровими, лише 5,8% припало на фізичні копії. На ПК фізичні ігри майже не купують (2%), на консолях купують 28%. Найбільше продавалася FIFA 23 (Велика Британія), Call of Duty Modern Warfare 2 (США), у Японії – Splatoon 3.

В умовах пандемії ігрова індустрія, яка у 2020 році вийшла на першу позицію за рівнем затребуваності і залишається там і зараз, незважаючи на невелике падіння у 2022 році, дарує розробникам ігор шанс знайти свою нішу. Навіть в умовах війни європейські та інші компанії були не проти поширити свої робочі місця для українців [3], тому розробка алгоритмів з використанням штучного інтелекту для ігрової індустрії є актуальною. При розробці ігор два шляхи: скористатись повністю готовим ШІ або ж взяти готові концепції та на їх основі створювати власний ШІ. Більш популярним в середовищі розробників є другий підхід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Штучний інтелект здатний трансформувати робочий процес у розробці ігор (геймдев, англ. games development, GameDev). Генеративний дизайн – нова технологія проєктування, яка дозволяє генерувати тривимірні моделі, предмети, людей, цілі всесвіти та переносити безпосередньо до 3D двигуна. Як інструментарій в генеративному дизайні використовують нейронні мережі. Нейронна мережа може навіть змінити спосіб створення 3D-контенту в іграх та генерувати кадри гри в режимі реального часу на основі зворотного зв'язку від користувача. Таку можливість надасть нова архітектура — варіаційні автоенкодері (VAE). Це генеративна нейромережа, яка вчиться зображати та вбудовувати об'єкти у потрібний простір. Прикладом такого застосування нейронної мережі є проєкт Enhancing Photorealism Enhancement [4], в якому графіка гри GTA V перетворюється на більш реалістичну на основі нейронного рендерингу, основою якого є навчання на цілій низці фотографій міських пейзажів.

Штучний інтелект у співпраці з художниками також здатен прискорити ідеєгенерацію при розробці концептів 3D-моделей, автоматизувати перенесення 2D-скетчів у 3D-моделі [5]. Так експерти NVIDIA презентували технологію Image2Car -інструмент доступний як розширення в AI Toy Vox в NVIDIA Omniverse, який переносить модель із 2D в 3D і створює точну тривимірну модель автомобіля за фото, відтворюючи всі пропорції [6] та анонсувала інструмент Audio2Face на основі штучного інтелекту, який створює реалістичні вирази обличчя з аудіо-файлу та панель Blender, яка спрямована на оптимізацію сцени.

Для створення ландшафтів найчастіше використовують автоматизований спосіб на основі алгоритму процедурної генерації, який створює шаблонний ландшафт. Для відтворення в такому шаблоні певного стилю, який схожий на Альпи чи Карпати в нагоді стає машинне навчання, яке дозволяє ШІ генерувати ландшафт за зразком побудованим художником [7].

Також ШІ незамінний при розробці режимів навчання, режимів PvE (Player vs Environment) і PvP (Player vs Player). Коли гравець розпочинає гру, наприклад World of Tanks, якщо він новачок, то потрапляє в режим навчання, де йому потрібно виконати певні практичні дії. З іншого боку, є противники та союзники, які чекають від гравця потрібних дій, виїжджають, стріляють та взаємодіють із гравцем. Вони допомагають навчити гравця базових механік. В процесі основної гри, поки досвіду у гравця небагато, він часто натрапляє на ботів-суперників, які сильніші

за навчальних ботів. Далі, окрім режиму PvP, багато гравців обирають режим PvE, тобто гру з середовищем, по суті гру проти ШІ. Основними підходами компанії Wargaming у розробці є Goal Oriented Action Planning, Behavior Tree, Utility System [8].

Мета дослідження

Метою дослідження є моделювання поведінки неігрових персонажів та програмна інтеграція її до ігрового рушія.

Основна частина

В якості рушія гри для тестування розробленої поведінки неігрових персонажів (англ. Non-Player Character, NPC) було обрано Unity – з одного боку, це інструмент для розробки відеоігор і застосунків, з іншого боку, рушія, на якому вони працюють. Застосунки, створені за допомогою Unity, підтримують DirectX та OpenGL. Unity – кросплатформний рушія, який дозволяє переносити створені проекти на різні платформи для запуску (мобільні пристрої, різні операційні системи), також він має зручний комплексний інтерфейс. Ігрова логіка застосунку пишеться мовою C#.

Моделювання поведінки неігрових персонажів

Серед неігрових персонажів виділяють ботів – ворожих до гравця ШІ-персонажів, що наближаються за можливостями до ігрового персонажа, та мобів – ворожих до гравця «низько-інтелектуальних» ШІ-персонажів. Моби взаємодіють з гравцями у великих кількостях, гравець їх знищує заради очок досвіду, артефактів або проходження території. В будь-який конкретний момент часу гравцю протистоїть невелика кількість ботів. Боти складніші в програмуванні ніж моби та дружні до гравця неігрові персонажі, яких так і зовуть NPC, відрізняючи від мобів та ботів.

Дерево поведінки – це формалізований підхід побудови поведінки NPC. Його особливість полягає в тому, що всі стани персонажа організовані у вигляді деревоподібної ієрархічної структури. Дерево поведінки містить у собі усі можливі стани, у яких може бути NPC [9, 10]. Коли у грі відбувається якась подія, ШІ перевіряє, в яких умовах знаходиться NPC, і перебирає всі стани у пошуках того, що підійде для нинішньої ситуації. Дерево поведінки відмінно підходить для того, щоб систематизувати стани NPC в іграх, в яких є безліч механік та геймплейних елементів. У ситуації, коли NPC бере участь у перестрілці, йому не потрібно буде шукати відповідну дію у гілці патрулювання. Такий підхід допомагає зробити поведінку NPC чуйною до ситуації в грі та забезпечує плавний перехід між різними станами. Замість визначення кінцевого набору станів персонажу визначається дерево вузлів з гілками з різною поведінкою. Дерева поведінки дозволяють зробити пріоритети дій простими: оскільки успішність дочірніх вузлів визначає те, як працює гілка, а отже, і дерево, поєднання складених «і» та «або» безпосередньо дає набір пріоритетних функцій, які нативно обробляють послідовності, переривання та резервні варіанти. Крім того така структура досить легко читається та візуалізується – достатньо слідкувати за гілками за пріоритетом і на кожному вузлі перевіряти, чи успішна вона чи ні, щоб знати, чи можна продовжити цю гілку чи треба перейти до наступної. Але найбільшою перевагою дерев поведінки є те, що вони дуже модульні та масштабовані: видаляючи або додаючи гілку, фактично додаємо або видаляємо функцію для персонажа; так само досить просто скопіювати піддерево та вставити її в інше місце, щоб скопіювати та вставити частину поведінки. Деякі піддерева можуть бути навіть повністю самодостатніми автономними бітами ігрової логіки, які потім можна повторно імпортувати та повторно використовувати в дереві поведінки іншого персонажа, щоб швидко реалізувати фрагменти системи (наприклад, слідування за ціллю, патрулювання між набором точок).

Крім того, така модульність означає, що можна будувати дерево по частинах і мати стратегію поступового проектування. На відміну від кінцевих автоматів, де, за визначенням, стани

максимально ізольовані один від одного наскільки це можливо, дерева поведінки набагато більш гнучкі від витоків інформації між вузлами. Незважаючи на те, що кожен вузол виконується сам по собі та живе власним життям, досить часто є певний стан спільних даних, до якого можна отримати доступ із різних точок дерева, щоб мати глобальні (хоча й залежні від контексту) змінні.

Для інтеграції розробленого дерева поведінки були поєднані вже існуюча модель гри у стилі рпг та власні сцени. Як об'єкт тестування був обраний NPC-охоронець, який патрулює локацію та атакує монстрів, якщо ті знаходяться в заданому радіусі.

Реалізація дерева поведінки виконувалася в два етапи:

1. Визначення загальної архітектури, яка може використовуватися будь-яким деревом поведінки разом із кількома складеними вузлами.

2. Розробка конкретної структури та його вузлів дерева поведінки охоронця.

На першому етапі був створений атомарний базовий клас Node C#, який представляє окремий елемент у дереві та може мати доступ як до дочірніх, так і до батьківських елементів, має стан вузла, який використовує перелік і може зберігати, отримувати або очищати спільні дані. Другий основний об'єкт – клас Tree, який є MonoBehaviour і містить посилання на кореневий вузол, який сам рекурсивно містить усе дерево. Йому потрібно лише виконувати дві речі: після старту будувати дерево поведінки відповідно до визначеної функції установки та у відповідному методі за наявності вже побудованого дерева, оцінювати його стан постійно. Алгоритм патрулювання потребує точок шляху для використання, а також посилання на перетворення агента, який виконує цю дію. Поведінку NPC для виявлення ворогів поблизу та переміщення до визначеної цілі визначають два вузли дерева: вузол CheckEnemyInFOVRange, який повертає успіх, якщо є принаймні один ворог поблизу у полі видимості або помилку, та вузол TaskGoToTarget, який переміщує охоронця до знайденої цілі.

Коли охоронець наближається дуже близько до ворога, і цей ворог потрапляє в зону його атаки, охоронець повинен переключатися в режим атаки і задавати певної шкоди ворогу. Для реалізації цих дій дерево поведінки має вузол перевірки для діапазону атаки та вузол завдання для фактичної атаки CheckEnemyInAttackRange, якщо він не знаходить ціль, він зазнає невдачі. Інакше, якщо ворог досить близько, він досягне успіху

Результати інтеграції розробленого дерева поведінки наведені на рис. 1.



Рис. 1. Результат виконання сцени з тестування поведінки автоматичного виявлення та атакування ворогів: а) режим патрулювання; б) режим атаки на ворогів

NPC-охоронець спочатку патрулює місцевість за заданими точками, потім помічає скелетів та атакує їх. Після знищення всіх монстрів охоронець повертається в початкове місце та продовжує патрулювати.

Моделювання вибору найкращого шляху для NPC

Дії неігрового персонажу безпосередньо пов'язані з його завданням: це може бути удар у ближньому бою, зайняття більш вигідної позиції для стрільянина, допомога союзнику. Незалежно від завдання агент має дістатися місця виконання дії — для цього йому потрібна

інформація про навколишнє середовище. Зазвичай такі дані містяться в навігаційній сітці (NavMesh) – це особлива карта, де зазначено, де NPC можуть пересуватися. Поверх навігаційної сітки може розташовуватися система вузлів, яка застосовується у тому, щоб NPC коректно виконували сценарії поведінки.

Алгоритм A* [10] є одним із найпопулярніших алгоритмів пошуку, який часто використовується в різних галузях інформатики, зокрема і в задачах штучного інтелекту [11], завдяки своїй ефективності та автономному характеру. Він використовує структуру даних сітки для виконання певного обходу графа, щоб знайти найкоротший шлях між двома точками. Він сприймається як розширення алгоритму Едсгера Дейкстри [10]. Однак, на відміну від алгоритму Дейкстри, алгоритм A* використовує евристику (допоміжну функцію) для управління пошуком для досягнення кращої продуктивності.

Алгоритм відвідує вершини, які, швидше за все, ведуть найкоротшим шляхом до мети. Такі вершини визначаються за формулою (1):

$$F(x) = G(x) + H(x), \quad (1)$$

де $F(x)$ – мінімальна вартість переходу до наступної вершини, чим менше функція, то «ближче» вершина стоїть у черзі відвідування; $G(x)$ – це вартість шляху від початкової вершини і до будь-якої іншої; $H(x)$ – це евристичний показник вартості шляху від вершини x і до кінцевої вершини. Обчислюючи $F(x)$, за x береться сусідня вже відвідана вершина, тобто алгоритм обчислює вартість всього шляху у всіх сусідніх вершин і зупиняє вибір на тій, у якої мінімальна вартість.

У A* використовується сітка, де кожна клітинка є «прохідною» або «непрохідною». Щоб знайти шлях між двома точками, треба спочатку обчислити відстань між ними, тобто необхідно вказати, як будемо вимірювати відстань між двома довільними клітинками в сітці [6].

Переваги алгоритму: швидкий пошук на відкритих просторах, його універсальність. Єдиним серйозним недоліком є те, що всі вузли, що утворюють обчислений шлях, зберігаються в пам'яті, що може потребувати великої кількості пам'яті для обчислення маршруту.

Модель переміщення неігрового персонажу із застосуванням алгоритму A* була реалізована у невеликій грі, всі сцени якої мають різний інтерфейс та тестують інтелектуальну поведінку неігрового персонажу.

У першій сцені користувач може керувати марсоходом (пасфандером) курсором миші для досягнення рожевого світла (рис. 2, а). NPC автоматично слідує до курсора миші, обираючи самий ефективний маршрут згідно алгоритму A*. Для зручності гравця є камера, яка дозволяє оглядати сцену в декількох режимах: режим 1 – відображення двох камер: зверху та від третьої особи (рис. 2, б), режим 2 – відображення тільки виду зверху, режим 3 – зміна камери на вид від третьої особи. Перший режим є початковим та при зміні режимів, до нього неможливо повернутись. Коли натискається кнопка камери, чергується режим 2 та 3.

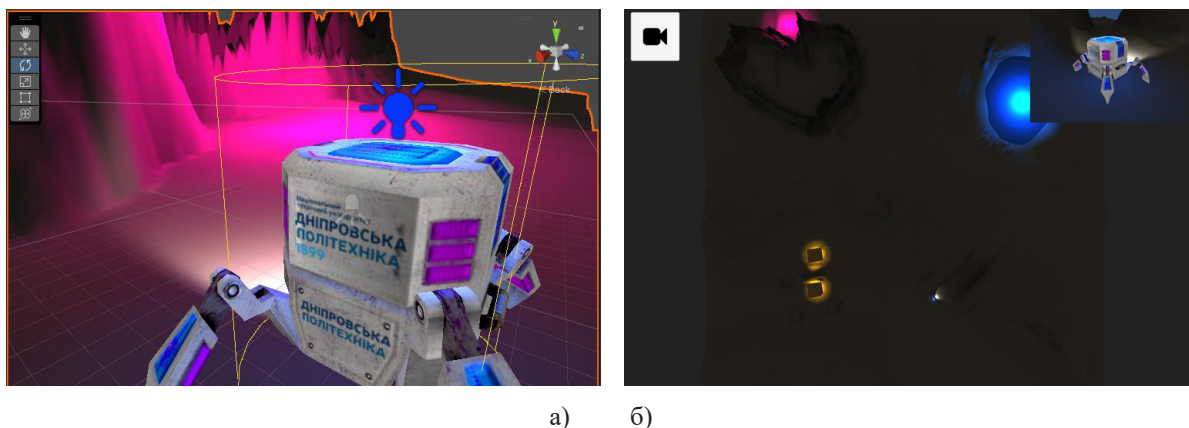


Рис. 2. Тестування знаходження найкоротшого шляху до заданої точки:
а) марсохід (пасфандер); б) режим камери першої сцени

У другій сцені тестується переміщення пасфандера з вибором маршруту переміщення між об'єктами для досягнення визначеної точки (одного з синіх ліхтарів) задля переключення на нову сцену (рис. 3).

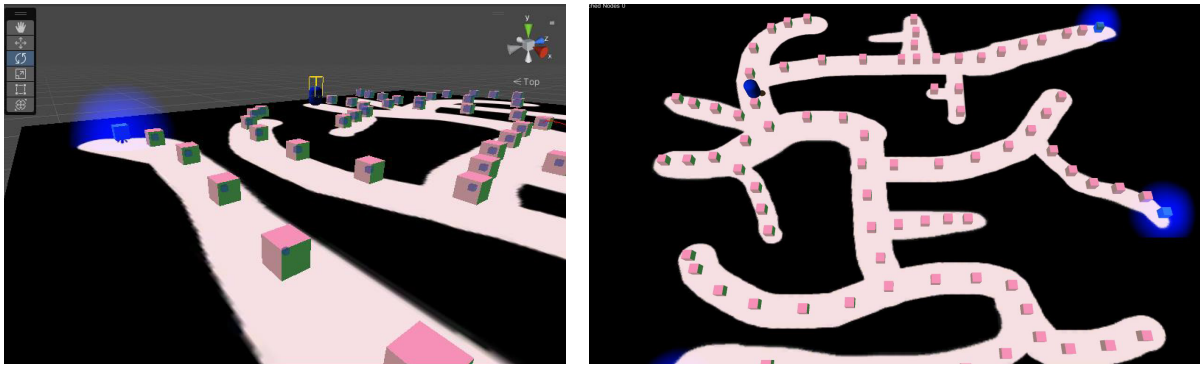


Рис. 3. Тестування знаходження найкоротшого шляху з вибором маршруту переміщення між об'єктами

Третя сцена – це кімната з перешкодами, яка візуалізує поведінку по зміні маршруту пасфандера при зіткненні з перешкодами. При досягненні голубого ліхтаря, йде переключення на нову сцену.

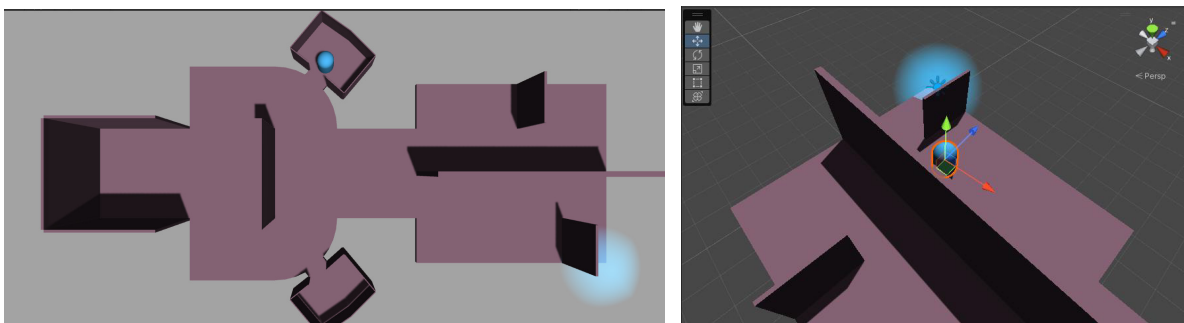


Рис. 4. Тестування поведінки по зміні маршруту при зіткненні з перешкодами

У четвертій сцені на полі з різними об'єктами можуть переміщуватись два марсоходи (рис. 5). Ця сцена наявно демонструє взаємодію двох об'єктів ігрового штучного інтелекту (при пошуку кращого маршруту) та заборону на переміщення одному з них у визначеній області. При досягненні червоного ліхтаря, йде переключення на нову сцену.



Рис. 5. Взаємодія двох об'єктів ігрового ШІ

П'ята сцена – це поле з різними об'єктами, які генеруються рандомним шляхом, по якому переміщується марсохід, обираючи максимально швидкий маршрут, обходячи ці об'єкти (рис. 6). Ця сцена наявно демонструє взаємодію об'єкта ігрового штучного інтелекту при пошуку кращого маршруту та великої кількості перешкод. При досягненні червоного ліхтаря, йде переключення на нову сцену.

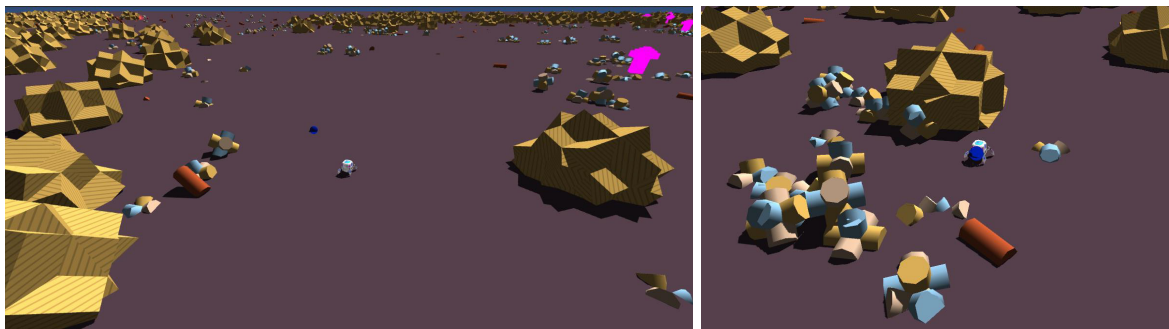


Рис. 6. Пошук максимально швидкого маршруту при великій кількості перешкод

Для демонстрації можливості використання пасфандінгу у 2D-просторі була створена шоста сцена гри – це двовимірний простір з ботом, який переміщується по ньому по раніше заданим дорогам (обираючи найкращий шлях, рис.7).

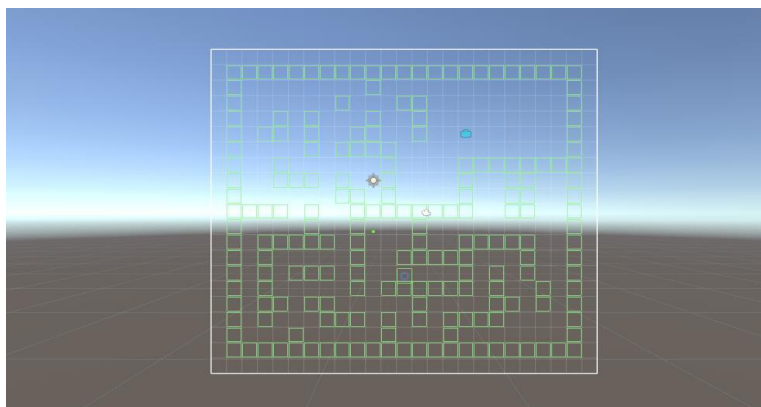


Рис. 7. Двовимірна візуалізація шляхів переміщення неігрового персонажу

Висновки

У роботі було розроблено модель поведінки неігрового персонажу, яка була протестована шляхом інтеграції до вже існуючої гри. Тестування підтвердило коректну роботу алгоритму поведінки об'єктів, їх взаємодії один з одним, відпрацювання різних кейсів оточуючого середовища та відсутність візуальних дефектів роботи алгоритму.

Розроблена міні-гра на основі існуючих моделей неігрових персонажів підтвердила ефективність застосування A* алгоритму пошуку найкоротшого шляху в різних ігрових умовах. Напрямом подальших досліджень є розширення ігрового застосунку до стабільної версії з чітким оповіданням та сюжетом, доопрацювання загального ігрового та дизайну кожного рівня для покращення взаємодії з користувачем та створення власних 3D моделей та інших ігрових ресурсів (асетів) замість безкоштовних.

Список використаної літератури

1. Google for Games. Beyond 2021: Where does gaming go next? Режим доступу:[<https://games.withgoogle.com/reports/beyondreport/>]

2. Batchelor J. GamesIndustry.biz presents... The Year In Numbers 2022. <https://www.gamesindustry.biz/gamesindustrybiz-presents-the-year-in-numbers-2022>.
3. Як знайти роботу в геймдеві під час війни? Історії українських спеціалістів, 2022. Режим доступу: [<https://gamedev.dou.ua/articles/how-to-get-a-job-in-gamedev-during-the-war-1/?from=recent>]
4. Richter S.R., AlHaija H.A., Koltun V. Enhancing Photorealism Enhancement. arXiv:2105.04619 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.04619>.
5. Максим Маковський. Як штучний інтелект може трансформувати робочий процес 3D-художників у геймдеві. 2022. Режим доступу: [<https://gamedev.dou.ua/blogs/ai-for-3D-artists-in-gamedev/>]
6. GANverse3D Extension. Режим доступу: [https://docs.omniverse.nvidia.com/prod_extensions/prod_extensions/ext_ganverse3d.html]
7. Noor S., Julian T., Mark J. N. Procedural Content Generation in Games: A Textbook and an Overview of Current Research. Springer. ISBN 978-3-319-42714-0. 237p.
8. Harbuzova A. Яка користь штучного інтелекту у розробці... 2021. Режим доступу: [<https://gamedev.dou.ua/articles/wargaming-developer-about-creating-ai-for-games/>]
9. Behaviour Trees. Режим доступу: [<https://learn.unity.com/project/behaviour-trees>]
10. Heineman G.T., Pollice G., Selkow S. Algorithms in a Nutshell. Second Edition. Beijing, Boston, Farnham, Sebastopol, Tokyo. O'Reilly Media, Inc. 2016. 390p.
11. Singhal A. A* Algorithm Example in AI. Gate Vidyalay. Режим доступу: [<https://www.gatevidyalay.com/a-algorithm-a-algorithm-example-in-ai/>]

References

1. Google for Games. Beyond 2021: Where does gaming go next? [<https://games.withgoogle.com/reports/beyondreport/>]
2. Batchelor J. GamesIndustry.biz presents... The Year In Numbers 2022. <https://www.gamesindustry.biz/gamesindustrybiz-presents-the-year-in-numbers-2022>
3. Як znaity robotu v heimdevi pid chas viiny? Istorii ukrainskykh spetsialistiv, (2022). [<https://gamedev.dou.ua/articles/how-to-get-a-job-in-gamedev-during-the-war-1/?from=recent>]
4. Richter S.R., AlHaija H.A., Koltun V. Enhancing Photorealism Enhancement. arXiv:2105.04619 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.04619>
5. Maksym Makovskyi. Yak shtuchnyi intelekt mozhe transformuvaty robochyi protses 3D-khudozhnykiv u heimdevi. (2022). [<https://gamedev.dou.ua/blogs/ai-for-3D-artists-in-gamedev/>]
6. GANverse3D Extension. [https://docs.omniverse.nvidia.com/prod_extensions/prod_extensions/ext_ganverse3d.html]
7. Noor, S., Julian, T., & Mark, J. N. Procedural Content Generation in Games: A Textbook and an Overview of Current Research. Springer. ISBN 978-3-319-42714-0.
8. Harbuzova, A. (2021). Yaka koryst shtuchoho intelektu u rozrobtci.... [<https://gamedev.dou.ua/articles/wargaming-developer-about-creating-ai-for-games/>]
9. Behaviour Trees. [<https://learn.unity.com/project/behaviour-trees>]
10. Heineman, G.T., Pollice, G., & Selkow, S. (2016). Algorithms in a Nutshell. Second Edition. Beijing, Boston, Farnham, Sebastopol, Tokyo. O'Reilly Media, Inc.
11. Singhal, A. A* Algorithm Example in AI. Gate Vidyalay. [<https://www.gatevidyalay.com/a-algorithm-a-algorithm-example-in-ai/>]

Соколова Наталя Олегівна, к.т.н., доц. кафедри Інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»; e-mail: n.olegowna@gmail.com ORCID: 0000-0003-2493-3553

Гнатушенко Володимир Володимирович, д.т.н., проф., завідувач кафедри Інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»; e-mail: vvgnat@ukr.net ORCID: 0000-0003-3140-3788

Міщенко Микита Сергійович, бакалавр Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»; e-mail: mishchenko.my.s@nmu.one

Атаманчук Олександра Анатоліївна, бакалавр Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»; e-mail: atamanchuk.o.a@nmu.one

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНІ ГЕОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ ПОВЕРХОНЬ КУПОЛІВ ПРАВОСЛАВНИХ ХРАМІВ

Нинішній етап розвитку України характеризується складним існуючим суспільно-економічним станом, пов'язаним із військовими діями на території нашої держави. У даний час велика кількість людей стрімко духовно повертається до вічних християнських цінностей. Тому в багатьох містах і селах країни інтенсивно відроджуються православні храми, інші культові споруди, здійснюється їх реставрація, облаштовуються місця паломництва тощо. При цьому актуальними є питання реформування церковного управління, належної реорганізації християнських громад у вигляді єпархій та парафій з метою їх вдосконалення. Успішному виконанню вказаних завдань сприяють комп'ютерні інформаційні технології, зокрема засоби геометричного моделювання. Останні становлять одну з фундаментальних основ відповідного програмного забезпечення для автоматизованого проектування різноманітних об'єктів і процесів.

У православній архітектурі куполи, що увінчують християнські храми, відіграють особливу провідну роль. Для людей ці будівельні конструкції уособлюють такі небесні образи як Бог, ангели, святі і т. д. У даному випадку доволі важливі застосовувані об'ємно-просторові архітектурні форми, які повинні мати певну індивідуальність. Зазначена особливість сприяє підвищенню символічної святості православних храмів, налаштовує при їх відвідуванні парафіян на духовне піднесення і прагнення до людської досконалості. Тому пророблення багатьох проектних варіантів опрацьовуваних куполів та вибір із них оптимального являє собою актуальну науково-прикладну задачу.

Прогресивною тенденцією в окресленому плані є методологія структурно-параметричного формоутворення. Викладені далі матеріали становлять продовження попередніх досліджень автора в розглянутому напрямку, розвивають висвітлені раніше у літературі відповідні результати. У статті також визначено шляхи подальшого розвитку запропонованих геометричних моделей для автоматизованого проектування православних храмів, удосконалення використовуваних при цьому способів, прийомів та алгоритмів комп'ютерного формоутворення.

Ключові слова: автоматизоване проектування, геометричне моделювання, комп'ютерні інформаційні технології, поверхні куполів, православні храми, структурно-параметричне формоутворення.

STRUCTURAL-PARAMETRIC GEOMETRIC MODELS OF DOMES SURFACES OF ORTHODOX TEMPLES

The current stage of Ukraine's development is characterized by a difficult existing socio-economic situation associated with military operations on the territory of our state. Currently, a large number of people are rapidly spiritually returning to eternal Christian values. Therefore, in many cities and villages of the country, Orthodox temples and other religious buildings are being intensively revived, their restoration is being carried out, places of pilgrimage are being arranged, etc. At the same time, the issues of reforming church administration, proper reorganization, with the aim of improvement, of Christian communities in the form of dioceses and parishes are relevant. The successful implementation of these tasks is facilitated by the available computer information technologies, in particular, geometric modeling tools. The latter constitute one of the basic foundations of proper software for computer-aided design of various objects and processes.

The domes crowning Christian temples play a special leading role in Orthodox architecture. For people, these building structures represent such heavenly images as God, angels, saints, etc. In this case, the applied volumetric-spatial architectural forms, which should have certain individuality, are quite important. This feature helps to increase the symbolic holiness of Orthodox temples, sets up parishioners for spiritual elevation and aspiration for their own human perfection when visiting them. Therefore, the study of many design variants for the researched domes and the choice of the optimal one from them is an actual scientific and applied task.

The progressive trend in the outlined plan is the methodology of structural-parametric shaping. The following materials are a continuation of the author's previous research in the considered direction and develop the corresponding results previously covered in the literature. The article also defines the ways of further development of the proposed geometric models for the automated design of Orthodox temples, the improvement of the methods, techniques and algorithms used for this computer shaping.

Keywords: automated design, geometric modeling, computer information technologies, dome surfaces, Orthodox temples, structural-parametric shaping.

Постановка проблеми

У зв'язку з нинішньою напруженою соціально-економічною ситуацією в Україні, спричиненою військовими діями, все більше наших людей звертаються до вічних духовних християнських цінностей. Останнє обумовлює необхідність будівництва нових та відновлення зруйнованих православних храмів. Куполи в них відтворюють небесні образи й тому мають велике символічне значення для парафіян. Відомо також, що об'ємно-просторові архітектурні форми культових споруд відіграють особливо важливу роль у релігійному плані, вимагають належної індивідуальності. Подані факти обумовлюють актуальність ефективного вирішення окресленої проблеми стосовно підвищення якості розглянутих об'єктів, зменшення витрат на їх проектування, виготовлення та подальшу експлуатацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У виданні [1] розглянуто питання національної ідентичності українських християнських храмів, відповідних традицій та новаторства. Ілюстрації належних вітчизняних споруд подано у праці [2]. У публікації [3] проаналізовано формоутворення баневих, тобто купольних, завершень церковних будівель. Показано, що саме ці конструкції забезпечують індивідуальність православних храмів. У роботі [4] досліджено різні форми куполів (конусну, яйцеподібну, маківку, цибульчасту, грушоподібну, гранчасту тощо), існуючі їх ярусності (одно-, дво- і триярусні), кількість у храмі (один, два, три, п'ять, сім, дев'ять і тринадцять). У виданні [5] висвітлено базові теоретичні положення методології структурно-параметричного геометричного моделювання. У публікаціях [6, 7] викладено відповідно його застосування для відтворення у православ'ї організаційного кластерного територіального управління. У статті [8] запропоновано спосіб структурно-параметричної побудови поверхонь куполів православних храмів для автоматизованого проектування.

Мета дослідження

Основне завдання даної роботи полягає в поданні математичного опису геометричних властивостей проєктованих куполів, зокрема, стосовно обчислення площ їх поверхонь та обмежуваних останніми об'ємів засобами комп'ютерних інформаційних технологій. Також в акцентуванні уваги на цих величинах як складових компонентах створюваних варіантних структурно-параметричних моделей, які використовуються для проведення відповідної багатаспектної оптимізації зазначених технічних об'єктів.

Викладення основного матеріалу дослідження

У виданні [8] розглянуто наступну множину форм куполів:

$$\Phi K = (\Phi K_i)_1^{N_{\Phi K}} = (\Phi K_i)_1^5, \quad (1)$$

де $\Phi K_1 = K\Phi$ – конусна, $\Phi K_2 = Я\Phi$ – яйцеподібна, $\Phi K_3 = M\Phi$ – маківка, $\Phi K_4 = Ц\Phi$ – цибульчаста, $\Phi K_5 = Г\Phi$ – грушоподібна.

Як базову твірну лінію для опрацьовуваних поверхонь обертання застосовано векторну параметричну криву другого порядку

$$\mathbf{r}(u) = \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_0 + 2w_1 u(1-u) \mathbf{r}_1 + u^2 \mathbf{r}_2}{(1-u)^2 + 2w_1 u(1-u) + u^2}, \quad (2)$$

де $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$, $\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $\mathbf{r}_2 = (x_2, y_2, z_2)$ – радіус-вектори в декартовій системі координат $Oxuz$ вершин характеристичної ламаної; $w_1 \geq 0$ – ваговий коефіцієнт вершини \mathbf{r}_1 ; $u \in [0, 1]$ – параметр.

Для форм куполів, що аналізуються, використано складений твірний контур із максимальним числом компонентів вигляду (2), яке дорівнює трьом, а саме:

$$TK = (TK_i)_1^{N_{TK}} = (TK_i)_1^3. \quad (3)$$

На рис. 1 показано деякі приклади належних твірних з характеристичними їх вершинами для певних куполів.

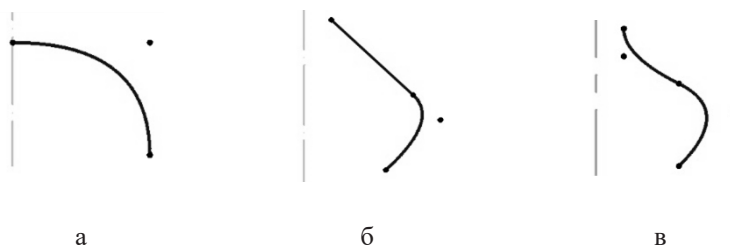


Рис. 1. Деякі структурно-параметричні варіанти твірного контуру (3):
а – яйцеподібний; б – маківка; в – цибульчастий

Яйцеподібному куполу (рис. 1, а) відповідає один елемент множини (3) з ваговим коефіцієнтом $w_1 \neq 0$, тобто дуга кривої другого порядку. Для маківки, див. рис. 1, б, додатково маємо ще відрізок прямої ($w_1=0$). Цибульчата форма (рис. 1, в) створюється двома компонентами, які забезпечують наявність точки перегину. Прийоми реалізації гладкості першого порядку розглянутих складених обводів загальновідомі.

На рис. 2 наведено поверхні куполів, які відповідають попереднім зображенням.

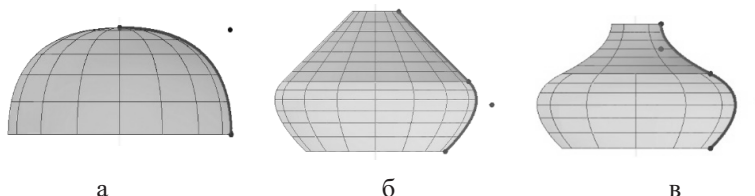


Рис. 2. Куполи:
а – яйцеподібний; б – маківка; в – цибульчастий

Подані фігури в декартовій системі координат $Oxyz$ з вертикальною віссю обертання z та твірним контуром у площині Oxz описуються залежностями:

$$r(u, v) = (x, y, z), \quad x = x(u) \cos v, \quad y = x(u) \sin v, \quad z = z(u), \quad (4)$$

де $u \in [0, 1]$, $v \in [0, 2\pi]$ – параметри; $x(u)$, $z(u)$ – величини згідно з виразами (2) і (3).

За формулою (4) визначаються й решта об'єктів (1).

У баневих завершеннях православних храмів куполи спираються на барабани, що являють собою вертикальні кругові циліндричні або гранні призматичні поверхні з основами у вигляді правильних багатокутників (див. рис. 3). Так на рис. 3, а зображено поєднання гранчастого барабана та цибульчастого купола, а на рис 3, б додатково проілюстровано ще один ярус, який включає круговий циліндричний барабан і яйцеподібний купол. Можливі також інші комбінації проаналізованих вище поверхонь. Наприклад, маківки з циліндричним або гранчастим барабаном. Акцентуємо увагу, що розглянуті проєктні фігури, зазвичай, різняться не тільки своєю формою, а й розмірами.

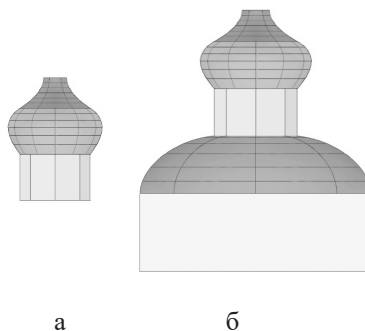


Рис. 3. Поєднання барабанів і куполів:
а, б – одно- та двоярусне банне завершення храму

Обчислення метричних характеристик куполів православних храмів становить головне завдання даної публікації. Стосовно циліндричних барабанів площа їх бічної поверхні розраховується за відомою формулою

$$S = 2\pi RH, \tag{5}$$

де R – радіус основи, H – висота, а об’єм

$$V = \pi R^2 H. \tag{6}$$

Це ж стосується призматичних барабанів з n бічними гранями. Належні величини визначаються співвідношеннями

$$S = 2RnH \sin\left(\frac{\pi}{n}\right), \tag{7}$$

де R – радіус кола, описаного навколо основи барабана, H – його висота,

$$V = \frac{nR^2 H}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right). \tag{8}$$

Площі та об’єми частин куполів, що відповідають окремим кривим (2), обчислюються за виразами

$$S = 2\pi \int_0^1 x(u) \sqrt{x'(u)^2 + z'(u)^2} du, \tag{9}$$

$$V = \pi \int_0^1 x^2(u) \cdot z'(u) du, \tag{10}$$

де

$$x'(u) = 2 \left(\frac{(1-w_1)(1-2u)((1-u)^2 x_0 + 2w_1 u(1-u)x_1 + u^2 x_2)}{p^2} + \frac{(u-1)x_0 + w_1(1-2u)x_1 + ux_2}{p} \right),$$

$$z'(u) = 2 \left(\frac{(1-w_1)(1-2u)((1-u)^2 z_0 + 2w_1 u(1-u)z_1 + u^2 z_2)}{p^2} + \frac{(u-1)z_0 + w_1(1-2u)z_1 + uz_2}{p} \right),$$

$$p = (1-u)^2 + 2w_1 u(1-u) + u^2.$$

Надалі отримані за формулами (9) і (10) величини підсумовуються для всіх кривих застосованого твірного контуру (3). У випадку кількох ярусів куполів залежності (5) ... (10) використовуються належну кількість разів.

Проілюструємо запропонований математичний апарат на прикладі рис. 3, б. Нехай у нижнього циліндричного барабана B_1 радіус $R=3000$ мм, а висота $H=2000$ мм. На підставі співвідношень (5) і (6)

$$S_{B_1} = 2\pi RH = 2\pi \cdot 3000 \cdot 2000 \text{ мм}^2 \approx 3,77 \cdot 10^7 \text{ мм}^2 = 37,7 \text{ м}^2, \tag{11}$$

$$V_{B_1} = \pi R^2 H = \pi \cdot 3000^2 \cdot 2000 \text{ мм}^3 \approx 5,655 \cdot 10^{10} \text{ мм}^3 = 56,55 \text{ м}^3. \tag{12}$$

Вважаємо, що твірна яйцеподібного купола визначається вершинами $r_0=(3000, 0, 2000)$, $r_1=(3000, 0, 4000)$, $r_2=(1200, 0, 4000)$, де координати в мм, та ваговим коефіцієнтом $w_1=0,7071$. Тоді, згідно з виразом (9)

$$S_{ЯК} = 2\pi \int_0^1 x(u) \sqrt{x'(u)^2 + z'(u)^2} du \approx 4,44 \cdot 10^7 \text{ мм}^2 = 44,4 \text{ м}^2. \tag{13}$$

Відповідно до формули (10)

$$V_{ЯК} = \pi \int_0^1 x^2(u) \cdot z'(u) du \approx 4,394 \cdot 10^{10} \text{ мм}^3 = 43,94 \text{ м}^3. \tag{14}$$

Для гранчастого барабана B_2 маємо радіус $R=1200$ мм описаного навколо основи кола та висоту $H=1400$ мм. На підставі залежностей (7) і (8)

$$S_{B_2} = 2RnH \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) = 2 \cdot 1200 \cdot 8 \cdot 1400 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \text{ мм}^2 \approx 1,029 \cdot 10^7 \text{ мм}^2 = 10,29 \text{ м}^2, \quad (15)$$

$$V_{B_2} = \frac{nR^2H}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) = \frac{8 \cdot 1200^2 \cdot 1400}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{8}\right) \approx 5,7 \cdot 10^9 \text{ мм}^3 = 5,7 \text{ м}^3. \quad (16)$$

Нижня твірна цибульчастого купола визначається вершинами $r_0=(1200, 0, 5400)$, $r_1=(2300, 0, 6200)$, $r_2=(1000, 0, 7200)$, де координати в мм, та ваговим коефіцієнтом $w_1=1$. Згідно з виразом (9)

$$S_{\text{шк}_1} = 2\pi \int_0^1 x(u) \sqrt{x'(u)^2 + z'(u)^2} du \approx 2,07 \cdot 10^7 \text{ мм}^2 = 20,7 \text{ м}^2. \quad (17)$$

Відповідно до формули (10)

$$V_{\text{шк}_1} = \pi \int_0^1 x^2(u) \cdot z'(u) du \approx 1,287 \cdot 10^{10} \text{ мм}^3 = 12,87 \text{ м}^3. \quad (18)$$

Верхня твірна цибульчастого купола визначається вершинами $r_0=(1000, 0, 7200)$, $r_1=(400, 0, 7661)$, $r_2=(400, 0, 8500)$, де координати в мм, та ваговим коефіцієнтом $w_1=1$. Згідно з виразом (9)

$$S_{\text{шк}_2} = 2\pi \int_0^1 x(u) \sqrt{x'(u)^2 + z'(u)^2} du \approx 5,57 \cdot 10^6 \text{ мм}^2 = 5,57 \text{ м}^2. \quad (19)$$

Відповідно до формули (10)

$$V_{\text{шк}_2} = \pi \int_0^1 x^2(u) \cdot z'(u) du \approx 1,45 \cdot 10^9 \text{ мм}^3 = 1,45 \text{ м}^3. \quad (20)$$

На основі величин (11) ... (20) бачимо, що зовнішня площа баневих завершень становить

$$S = S_{B_1} + S_{\text{як}} + S_{B_2} + S_{\text{шк}_1} + S_{\text{шк}_2} = (37,7 + 44,4 + 10,29 + 20,7 + 5,57) \text{ м}^2 = 118,66 \text{ м}^2, \quad (21)$$

а їх об'єм

$$V = V_{B_1} + V_{\text{як}} + V_{B_2} + V_{\text{шк}_1} + V_{\text{шк}_2} = (56,55 + 43,94 + 5,7 + 12,87 + 1,45) \text{ м}^3 = 120,51 \text{ м}^3. \quad (22)$$

Величини (21) ... (22) для проаналізованого варіанта проєктованого храму суттєво впливають не тільки на його індивідуальність та естетичний вигляд, але й на такі технічні особливості розглянутої будівлі як її міцність, довговічність, ефективність функціонування, вартість зведення, подальшої експлуатації і т. д. Зазначені властивості доволі часто мають суперечливий характер, тому потребують здійснення належної багатоаспектної оптимізації. Останнє пов'язано з потребами проведення багатьох ітераційних розрахунків. Одним із прогресивних напрямків у цьому плані є комп'ютерне структурно-параметричне формоутворення. Наведений вище математичний апарат зручно адаптується до вказаної методології автоматизованого проєктування. У її рамках існують належні перспективи напрацювання відповідних нових продуктивних способів, прийомів та алгоритмів геометричного моделювання.

Висновки

Статтю присвячено актуальній проблемі будівництва й відновлення в Україні зруйнованих під час воєнних дій православних храмів, зокрема формоутворенню їх баневих завершень. Головною метою при цьому є зменшення витрат на розроблення, зведення та подальшу експлуатацію вказаних будівель з одночасним підвищенням їх естетичної й технічної досконалості за рахунок ефективного автоматизованого проєктування. Подано математичний апарат для обчислення площ купольних поверхонь та обмежуваних ними об'ємів засобами комп'ютерних інформаційних технологій. Акцентовано увагу на зазначених величинах як складових компонентах варіантних структурно-параметричних моделей, що використовуються для проведення відповідної багатоаспектної оптимізації розглянутих технічних об'єктів. Зазначено, що перспективами подальших наукових досліджень може бути опрацювання прорізів у барабанах куполів, різновидів хрестів, які вінчають храми, і т. д.

Список використаної літератури

1. Гнідець Р. Б. Національна ідентичність архітектури українських церков у традиції та новаторстві їх вираження. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Архітектура*. 2015. № 836. С. 168–175.
2. Івченко А. Православні храми України. *Світосгляд*. 2018. № 4(72). С. 7–15.
3. Гнідець Р.Б. Традиція у формах баневих завершень церков українського архітектурного модерну та її вираження в сучасному храмобудуванні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Архітектура*. 2008. № 632. С. 7–14.
4. Слепцов О. С. Архітектурне проектування і реконструкція православних храмів. Київ: А+С, 2014. 272 с.
5. Ванін В. В., Вірченко Г. А. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання. *Геометричне та комп'ютерне моделювання*. 2009. Вип. 23. С. 42–48.
6. Терещук М. О. До питання геометричного моделювання організаційних кластерних структур православ'я. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2021. Вип. 101. С. 195–207.
7. Терещук М. О. Кластерні елементи територіального управління в православ'ї. *Управління розвитком складних систем*. 2022. Вип. 51. С. 94–100.
8. Терещук М. О. Структурно-параметричний спосіб формоутворення куполів православних храмів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2022. Вип. 103. С. 201–208.

References

1. Hnidets, R. B. (2015). The national identity of the architecture of Ukrainian churches in the tradition and innovation of their expression. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Arkhitektura*. **836**, 168–175.
2. Ivchenko, A. (2018). Orthodox temples of Ukraine. *Svitohliad*. **4** (72), 7–15.
3. Hnidets, R. B. (2008). The tradition in the forms of banyan ends of Ukrainian architectural modern churches and its expression in modern temple construction. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Arkhitektura*. **632**, 7–14.
4. Slietsov, O. S. (2014). Architectural design and reconstruction of Orthodox temples. Kyiv: A+S.
5. Vanin, V. V., & Virchenko, G. A. (2009). Definition and basic provisions of structural-parametric geometric modeling. *Heometrychne ta kompiuterne modeliuвання*. **23**, 42–48.
6. Tereschuk, M. O. (2021). To the question of geometric modeling of organizational cluster structures in Orthodoxy. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*. **101**, 195–207.
7. Tereschuk, M. O. (2022). Cluster elements of territorial management in Orthodoxy. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*. **51**, 94–100.
8. Tereschuk, M. O. (2022). Structural-parametric method of shaping domes of Orthodox temples. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*. **103**, 201–208.

Терещук Микола Олександрович – к.т.н., докторант кафедри архітектурних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури. E-mail: nikolatereschuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4444-3677.

Л.С. ФОНАР, О.С. КОНОВАЛОВ, Є.Г. ФІЛІППОВ
Національний університет Одеська політехніка

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГРОЗ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВЕБ-ТЕХНОЛОГІЙ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Метою проведеного дослідження є аналіз стану безпеки використання Google Classroom в університеті «Одеська політехніка» та змін у адмініструванні навчальної платформи за 2020-2022 роки в умовах вимушеного карантину, воєнного стану та дистанційного навчання. Активне впровадження дистанційного навчання вимагає дослідження захисту інформації при обміні та зберіганні даних. Однією з систем дистанційного навчання університету «Одеська політехніка» є Google Classroom. Основна перевага – безкоштовність сервісів, адміністрування закладом, вхід за допомогою звичайного аккаунту Gmail. Ретельно продумана структура адміністрування та організації роботи сервісу є вирішальною для ефективного управління обліковим записом G Suite for Education. Актуальною проблемою є створення освітнього простору за допомогою веб-технологій та організація безпечного доступу користувачів до ресурсів. Важливим аспектом також є психологічний та педагогічний аспект використання дистанційного навчання, яке може проводитись в синхронному, або асинхронному виді. У роботі проведено дослідження загроз інформаційної безпеки веб-технологій дистанційного навчання Google Classroom для користувачів та порівняння заходів адміністрування у 2020-2022 роках. Для протидії актуальним загрозам для систем дистанційного навчання університету і зменшення ризиків в межах допустимого, використовуються різні механізми і засоби захисту інформації, організаційно-правового, технічного та програмного характеру, які повинні враховувати ряд особливостей, пов'язаних з процесом їх функціонування. Система дистанційної освіти університету повинна бути доступна для здобувачів, викладачів та адміністраторів цілодобово. Забезпечення захисту від загроз повинно здійснюватися як на етапі проектування і розробки самої системи дистанційної освіти, так і в процесі його експлуатації, та внесенням, у разі необхідності, своєчасних коректив. Проаналізовано адміністрування системи дистанційної освіти університету «Одеська політехніка» та зроблені такі висновки та рекомендації для покращення інформаційної безпеки.

Ключові слова: система дистанційного навчання, заклад вищої освіти, захист інформації, Google Classroom, веб-технології, адміністрування.

L.S. FONAR, O.S. KONOVALOV, E.G. FILIPPOV
Odesa Polytechnic National University

STUDY OF INFORMATION SECURITY THREATS AT USED WEB TECHNOLOGIES OF DISTANCE EDUCATION

The purpose of the research is to analyze the state of security of using Google Classroom at the Odesa Polytechnic University and changes in the administration of the educational platform for 2020-2022 in the conditions of forced quarantine, martial law and distance learning. The active implementation of distance learning requires research on information protection during data exchange and storage. One of the distance learning systems of Odesa Polytechnic National University is Google Classroom. The main advantage is free services, institution administration, login using a regular Gmail account. A carefully thought-out structure of administration and organization of the service is crucial to the effective management of the G Suite for Education account. An urgent problem is the creation of an educational space using web technologies and the organization of secure user access to resources. An important aspect is also the psychological and pedagogical aspect of the use of distance learning, which can be conducted in a synchronous or asynchronous form. In the work, a study of threats to the information security of Google Classroom distance learning web technologies for users and a comparison of administration measures in 2020-2022 was carried out. Various mechanisms and means of information protection, of an organizational, legal, technical and programmatic nature, are used to counter actual threats to the university's distance learning systems and to reduce risks within the permissible limits, which must take into account a number of features related to the process of their functioning. The distance education system of the university should be available to students, teachers and administrators around the clock. Ensuring protection against threats should be carried out both at the stage of designing and developing the distance education system itself, as well as during its operation and making, if necessary, timely adjustments. The administration of the distance education system of the Odesa Polytechnic National University was analyzed and the following conclusions and recommendations were made for improving information security.

Keywords: distance learning system, higher education institution, information protection, Google Classroom, web technologies, administration.

Постановка проблеми

Актуальною проблемою системи вищої освіти в Україні за останні роки є аналіз використання веб-технологій для дистанційного навчання в умовах пандемії та воєнного стану. Вимушений перехід багатьох закладів освіти у веб-простір вимагає аналізу безпеки користування різноманітними сервісами. Важливим є дослідження загроз інформаційної безпеки для персональних даних студентів та викладачів, систем оцінювання, збору та зберігання даних. Також використання он-лайн сервісів у освіті підвищує вимоги до автентифікації користувачів, бо дистанційне навчання у багатьох випадках ускладнює об'єктивність оцінювання знань. Разом з тим, використання веб-технологій може полегшити збір даних, зменшити паперовий документообіг між викладачем та здобувачами, спростити доступ до матеріалів, лекцій, методичних вказівок та іноді навіть покращити комунікацію між учасниками навчального процесу. Метою проведеного дослідження є аналіз стану безпеки використання Google Classroom в університеті «Одеська політехніка» та змін у адмініструванні навчальної платформи за 2020-2022 роки в умовах вимушеного карантину, воєнного стану та дистанційного навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання веб-технологій дистанційного навчання (ВТДН) надає можливість здобувачам отримувати необхідні знання віддалено від навчального закладу в будь-який зручний час. Права та обов'язки учасників навчального процесу при ВТДН регулюються «Положенням про дистанційне навчання» [1] та Законом України про вищу освіту [2].

При впровадженні систем дистанційного навчання перед закладом та здобувачами освіти постають проблеми добору програмних засобів та раціонального використання освітніх інформаційних ресурсів, створених на їх основі [3, 4]. Тому актуальною проблемою є створення освітнього простору за допомогою веб-технологій та організація безпечного доступу користувачів до ресурсів. Важливим аспектом також є психологічний та педагогічний аспект використання дистанційного навчання, яке може проводитись в синхронному або асинхронному виді.

Організаційна підтримка здобувачів з боку викладача під час дистанційного викладання курсів дисциплін в переважній більшості формує позитивну та дружнє середовище навчання. Необхідно забезпечувати наявність засобів оперативної електронної комунікації учасників навчального процесу з адміністрацією навчального закладу, викладачем, між собою. Найчастіше це можливо організувати за допомогою форуму, чату, електронної пошти, сторінок в соціальних мережах, месенджерів тощо [5, 6].

Разом з тим, використання веб-технологій у дистанційному освітньому середовищі має свої переваги [7 - 12]: можливість зберігати великі масиви даних, спрощення публікації, розміщення навчальних матеріалів, безперервність освітнього процесу, групова спрямованість (корпоративність), спільна робота викладачів і студентів, активація самостійної діяльності, можливість інтеграції навчальних дисциплін тощо.

Мета дослідження

Метою проведеного дослідження є аналіз стану безпеки використання Google Classroom в Національному університеті «Одеська політехніка» та змін у адмініструванні навчальної платформи за 2020-2022 роки в умовах вимушеного карантину, воєнного стану та дистанційного навчання та надання рекомендацій для підвищення інформаційної безпеки користувачів ресурсу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Використання Google Classroom [13, 14] у освітньому процесі відповідає [1]: це інформаційно-комунікаційні технології дистанційного навчання – технології створення, накопичення, зберігання та доступу до веб-ресурсів (електронних ресурсів) навчальних дисциплін (програм),

а також забезпечення організації і супроводу навчального процесу за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення та засобів інформаційно-комунікаційного зв'язку, у тому числі Інтернету. Google Classroom дозволяють працювати зі добувачами як в асинхронному режимі, так і в синхронному – за допомогою сервісу Google Workspace for Education Fundamentals, це набір безкоштовних інструментів і сервісів Google, розроблених спеціально для навчальних закладів і організацій, що займаються домашнім навчанням. Конфіденційність персональних даних користувачів забезпечується сервісами компанії Google та адміністрацією.

Дані користувачів, які створюються в сервісах Google Classroom, або завантажені туди, шифруються при зберіганні. Крім того, всі сервіси G Suite працюють через протокол HTTPS, тому дані також захищені при передачі між центрами обробки даних та при доступі з окремого пристрою.

Організаційні блоки дозволяють розподіляти на сегменти користувачів та надавати різноманітні послуги, налаштування та дозволи різним користувачам. Ретельно продумана структура адміністрування та організації роботи сервісу є вирішальною для ефективного управління обліковим записом G Suite for Education. На початку впровадження сервісу в начальному закладі в консолі адміністратора Google всі користувачі і пристрої об'єднані лише в один організаційний підрозділ, цей підрозділ називають організаційним підрозділом верхнього рівня. Тому на початковому етапі всі налаштування адміністратора застосовуються до всіх користувачів та пристроїв у обліковому записі.

Щоб створити різні налаштування для різних груп користувачів або пристроїв, необхідно додати підрозділ нижчого рівня, для цього використовують групи. Організаційні блоки першого рівня організовані за ролями «студенти» та «викладачі».

Для кожного користувача (студента та викладача університету), якому необхідно створити окремий акаунт, потрібно додати до таблиці наступну інформацію в стовпці: ім'я, прізвище, адреса електронної пошти, шлях до організаційного підрозділу. Заповнивши таблицю, її зберігають як файл CSV (.csv) в кодуванні UTF-8.

Потенційні загрози інформації системи відділу технологій дистанційного навчання (ВТДН) викладено у табл.1.

Коли адміністратор перевіряє викладачів, він забороняє «не викладачу» створювати Класи. Якщо викладач помилково ідентифікував себе як «студент», адміністратор повинен власноруч додати викладача в групу «Викладачі», щоб надати можливість створювати класи. У загальному випадку Адміністратор може вказати, хто має право в університеті створювати Класи. Можливі такі варіанти налаштувань:

1. Item 1
2. Item 2
3. Item 3

або:

- всі в цьому домені (викладачі та студенти);
- викладачі, які очікують підтвердження і перевірені викладачі;
- тільки перевірені викладачі.

В університеті «Одеська політехніка» створювати Класи можуть тільки перевірені викладачі. Зловмисник, як зовнішній так і внутрішній, при реалізації атаки може переслідувати такі цілі:

- перевищення привілеїв;
- отримання несанкціонованого доступу до ресурсів;
- отримання контролю над курсом;
- отримання доступу до внутрішньої системи університету;
- крадіжка інтелектуальної власності;
- крадіжка оціночних матеріалів;
- отримання доступу до персональних даних;
- розголошення персональних даних;

- внесення змін до бази даних навчальних відомостей з оцінками та модулями;
- отримання несанкціонованого доступу до службової інформації навчального закладу;
- порушення цілісності або знищення навчальних матеріалів;
- порушення цілісності або знищення даних про навчальний процес;
- порушення доступності до матеріалів навчальних курсів для користувачів.

При реалізації атак зловмисник може використати:

- уразливості в веб-додатках
- уразливості в сервісах;
- слабкі паролі;
- недоліки процесу аутентифікації;
- помилки в конфігурації і адмініструванні;
- шкідливе програмне забезпечення;
- слабкості системи захисту інформації;
- спам, фішинг.

Таблиця 1

Потенційні загрози веб-технологій дистанційного навчання

Елемент ВТДН	Загрози	Наслідки
Веб-інтерфейс (обмін інформацією, доступ до курсів і матеріалів)	Підробка міжсайтових запитів – CSRF, атаки на браузер клієнта, віддалене виконання коду і відмова в обслуговуванні сервісів web-додатків, спам, фішинг.	Порушення конфіденційності, цілісності і доступності інформації і сервісів веб-додатків.
Сервер ВТДН (підсистеми: управління навчальними курсами; тестування, календар, адміністрування)	Перебір паролів, підвищення привілеїв користувачів, помилки адміністрування, сканування портів.	Порушення конфіденційності, цілісності і доступності інформації, проникнення в ІС.
База даних (навчальні курси, списки академічних груп, персональні дані, бібліотеки, відомості)	випадкове або навмисне видалення / модифікація даних в БД і журналах транзакцій, крадіжка персональних даних, несанкціонований доступу до бази даних і журналів.	Відмова від зобов'язань і скоєних дій, порушення авторського права, порушення цілісності і конфіденційності.

Для протидії актуальним загрозам для систем дистанційного навчання університету і зменшення ризиків в межах допустимого, використовуються різні механізми і засоби захисту інформації, організаційно-правового, технічного та програмного характеру, які повинні враховувати ряд особливостей, пов'язаних з процесом їх функціонування:

- система дистанційної освіти університету повинна бути доступна для здобувачі, викладачів та адміністраторів цілодобово;
- міжмережеві екрани і застосування SSL не завжди забезпечують захист від злому системи дистанційної освіти, оскільки доступ до веб-сайту з зовнішніх мереж повинен бути завжди відкритий;

Отже, забезпечення захисту від загроз повинно здійснюватися як на етапі проектування і розробки самої системи дистанційної освіти, так і в процесі його експлуатації та внесенням, у разі необхідності, своєчасних корегувань.

У 2020 році приєднатися до курсу можна було наступними способами [15]: перейти за посиланням, яке відправлено викладачем; вказати код курсу, наданий викладачем; прийняти запрошення, надіслане викладачем на електронну пошту. У 2021 році політика доступу була змінена та зараз приєднатися до Класу можна лише за запрошенням, висланим викладачем на електронну пошту по університетським акаунтам. Цей спосіб захищає дані курсу від доступу сторонніх користувачів. При запрошенні студентів до групи викладача з домену університету,

йому не обов'язково знати або окремо збирати електронні пошти кожного студента, достатньо лише знати прізвище та ім'я – всі акаунти вже внесені адміністратором до системи та викладач може знайти потрібного студента без його пошти.

В університеті «Одеська політехніка» система налаштована так, що викладач сам створює групи та додає до них користувачів, груп може бути декілька. Викладач може додати іншого викладача університету в групу по університетському акаунту, але не може додати викладачів зі сторонніми акаунтами (у 2020 році ця можливість ще зберігалась). Ця заборона також підвищує захист даних та унеможливорює сторонній доступ до конфіденційної інформації (наприклад особисті дані студентів груп, до яких помилково запросили стороннього викладача).

У 2020 в групах до матеріалів курсу окремо були налаштовані наступні параметри: якщо викладач надав доступ до групи користувачеві з особистим обліковим записом (не з домену університету), то йому буде наданий доступ до перегляду документів групи, але буде діяти заборона на виконання тестів. Це давало можливість налаштувати перегляд файлів для членів групи, незалежно від того, через який акаунт був виконаний вхід, документи для перегляду були доступні у будь-якому випадку, а на проходження тесту налаштований захист, який передбачав, що студент повинен перебувати в групі саме з акаунту університету. Але з 2021 року перегляд тестів також можливий лише з університетських акаунтів, що збільшило захист інформації від стороннього доступу.

Висновки

Проаналізувавши адміністрування системи дистанційної освіти університету «Одеська політехніка», можна зробити такі висновки та рекомендації:

- налаштування декількох облікових записів адміністраторів та суперадміністраторів може допомогти при втраті або зламу облікового запису суперадміністратора;
- необхідно обов'язково вимагати двоетапну перевірку для облікових записів та використовувати ключі безпеки для двоетапної аутентифікації;
- необхідна заборона користування обліковим записом суперадміністратора для повсякденних дій;
- необхідно налаштувати попередження адміністратора по електронній пошті для відстеження активності потенційних ризиків безпеки, наприклад, підозрілих спробах входу в систему, зламу мобільних пристроїв або змін, внесених іншим адміністратором;
- заборона додавати до груп Google Classroom сторонніх викладачів та студентів посилює заходи безпеки та захист персональних даних користувачів;
- якщо необхідно видалити обліковий запис викладача, то потрібно переконатися, що його Класи з матеріалами та роботами по дисциплінам більше не використовуються студентами або іншими викладачами. Якщо Клас використовується, необхідно передати право володіння іншому викладачеві, щоб не втратити доступ до даних.

Список використаної літератури

1. Про затвердження Положення про дистанційне навчання <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0703-13#n18>
2. Про вищу освіту: Закон України від 27.10.2022 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>
3. Олексюк В. П. Єдина система автентифікації як крок до створення освітнього простору загальноосвітнього навчального закладу. *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Серія 2, Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання : Збірник наукових праць / М-во освіти і науки України, Нац. пед. ун-т ім. М.П. Драгоманова. – К. : Вид-во НПУ ім. М.П. Драгоманова, Вип. 13 (20). 2012. С. 188-193.*
4. Назар М. М. Компоненти продуктивного дистанційного навчального курсу. *Новітні комп'ютерні технології*, Том 17, 2019. С. 114-128. <https://doi.org/10.55056/nocote.v17i0.954>

5. Назар М. М. Специфіка психологічного впливу навчання користувачів мережі Інтернет. *Освіта дорослих в Україні : IX Міжнар. наук.-практ. конф.*, (Київ, 11–17 вер. 2008 р.) : зб. наук. праць. К. : ЕКМО, 2008. С. 102-104.
6. Дяченко О.Ф. Дидактичні можливості хмарних технологій при вивченні інформатичних дисциплін бакалаврів із системного аналізу. *Новітні комп'ютерні технології*, Том 17, 2019. – С.159-162. <https://doi.org/10.55056/nocote.v17i0.959>
7. Рашевська Н.В., Семеріков С.О., Словак К.І., Стрюк А.М. Модель комбінованого навчання у вищій школі України : збірник наукових праць. Харків : Міськдрук, 2011. С. 54-59.
8. Khoroshylova I., Baidala V. Role of information and communication technology in education. Сучасні тенденції організаційно-методологічного забезпечення підготовки фахівців: проблеми та шляхи їх вирішення в умовах глобалізації та євроекономічної інтеграції: *Зб. матеріалів Всеукр. наук.-метод. інтернет-конф. з проблем вищої освіти і науки*, Харків, 18 лист. 2019 р. / Харків. нац. автомобільно-дорожній ун-т. Харків : ХНАДУ, 2019. С. 330–333.
9. Мерзликін О. В., Семеріков С. О. Перспективні хмарні технології в освіті. Хмарні технології в сучасному університеті (ХТСУ-2015): *Матеріали доповідей науково-практичного семінару*. Черкаси : ЧДТУ, 2015. С. 31-33.
10. Anna V. Iatsyshyn, Valeriia O. Kovach, Yevhen O. Romanenko, Andrii V. Iatsyshyn Cloud services application ways for preparation of future PhD [Electronic resource]. *Cloud Technologies in Education: Proceedings of the 6th Workshop on Cloud Technologies in Education* (CTE 2018), Kryvyi Rih, Ukraine, December 21, 2018 / Edited by : Arnold E. Kiv, Vladimir N. Soloviev. P. 197-216. (CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol. 2433). Access mode : <http://ceur-ws.org/Vol-2433/paper12.pdf>
11. Tuncay, E.: Effective use of cloud computing in educational institutions. *Procedia. Social and Behavioral Sciences* 2(2), 2010. P. 938–942. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.03.130>
12. Вакалюк Т. А. Хмарні технології в освіті : навч.-метод. посіб. для студентів фізико-математичного факультету. Житомир: вид-во ЖДУ, 2016. 72 с.
13. Classroom https://edu.google.com/products/classroom/?modal_active=none
14. Education Fundamentals <https://edu.google.com/products/workspace-for-education/education-fundamentals/>
15. Дорофєєва І., Фонар Л. Аналіз стану інформаційної безпеки систем дистанційної освіти Moodle та Google Classroom. *Матеріали конференцій Молодіжної наукової ліги*. Вінниця, 2020. С. 27-29. <https://doi.org/10.36074/27.11.2020.v2.02>

References

1. About the approval of the Regulations on distance learning URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0703-13#n18>
2. Law of Ukraine on Higher Education URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Tex>
3. Oleksyuk, V. (2012). Yedyna systema avtentyfikatsii yak krok do stvorennia osvithnoho prostoru zahalnoosvitnoho navchalnoho zakladu. [Unified authentication as a step towards the creation of the educational space of general educational institutions]. *Scientific journal of NPU named after M. P. Drahomanov. Series 2. Computer-oriented educational systems : collection of scientific*. К. : NPU named after M. P. Drahomanov, **13** (20), 188–193. URL: <http://elar.fizmat.tnpu.edu.ua/handle/123456789/87>. (in Ukrainian)
4. Nazar, M. M. (2019). Komponenty produktyvnoho dystantsiinoho navchalnoho kursu [Components of efficient distance learning course]. *New Computer Technology*, **17**, 114–128. Retrieved from <https://ccjournals.eu/ojs/index.php/nocote/article/view/954>
5. Nazar, M. M. (2008). Spetsyfika psykholohichnoho vplyvu navchannia korystuvachiv merezhi Internet [Specificity of psychological influence of training of Internet users]. *Osvita doroslykh*

- v Ukraini : IX Mizhnar. nauk.-prakt. konf., (Kyiv, 11–17 ver. 2008 r.) : zb. nauk. prats. – K. : EKMO, 102-104.
6. Djachenko, O. F. (2019). Dydaktychni mozhyvosti khmarnykh tekhnolohii pry vyvchenni informatychnykh dystsyplyn bakalavriv iz systemnoho analizu. [The didactic potential of cloud technologies in the study of computing disciplines by bachelors in system analysis]. *New Computer Technology*, **17**, 159-162. Retrieved from <https://cejournals.eu/ojs/index.php/nocote/article/view/959>
 7. Rashevskaya, N. V., Semerikov, S. O., Slovak, K. I., & Striuk, A. M. (2011). Model kombinovanoho navchannia u vyshchii shkoli Ukrainy [The blended learning model in Ukrainian higher education]. *Sbornik nauchnykh trudov*. Kharkiv : Miskdruk, 54-59. (In Ukrainian)
 8. Khoroshylova, I., & Baidala, V. (2019). Role of information and communication technology in education. Suchasni tendentsii orhanizatsiino-metodolohichnoho zabezpechennia pidhotovky fakhivtsiv: problemy ta shliakhy yikh vyrishennia v umovakh hlobalizatsii ta yevroekonomichnoi intehratsii : *zb. materialiv Vseukr. nauk.-metod. internet-konf. z problem vyshchoi osvity i nauky*, Kharkiv, 18 lyst. 2019 r. / Kharkiv. nats. avtomobilno-dorozhnyi un-t. Kharkiv : KhNADU, 330–333.
 9. Merzlykin, O. V., & Semerikov, S. O. (2015). Perspektyvni khmarni tekhnolohii v osviti [Prospective cloud technologies in education]. In: *Materialy dopovidei nauково-praktychnoho seminaru “Khmarni tekhnolohii v suchasnomu universyteti”* (KhTSU–2015), ChDTU, Cherkasy, 31–33.
 10. Iatsyshyn, A.V., Kovach, V.O., Romanenko, O.Y., & Iatsyshyn, A.V.(2018). Cloud services application ways for preparation of future PhD [Electronic resource]. *Cloud Technologies in Education : Proceedings of the 6th Workshop on Cloud Technologies in Education*, Kryvyi Rih, Ukraine, December 21, Edited by : Arnold E. Kiv, Vladimir N. Soloviev. 197-216. (CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol. 2433). Access mode : <http://ceur-ws.org/Vol-2433/paper12.pdf>
 11. Tuncay, E. (2010). Effective use of cloud computing in educational institutions. *Procedia. Social and Behavioral Sciences*. **2**(2), 938–942. doi:10.1016/j.sbspro.2010.03.130
 12. Vakaliuk, T.A. (2016). Khmarni tekhnolohii v osviti [Cloud technology in education]. ZhSU Publishing House, Zhytomyr
 13. Classroom https://edu.google.com/products/classroom/?modal_active=none
 14. Education Fundamentals <https://edu.google.com/products/workspace-for-education/education-fundamentals/>
 15. Dorofeeva, I., & Fonar, L. (2020). Analiz stanu informatsiinoi bezpeky system dystantsiinoi osvity Moodle ta Google Classroom. [Analysis of the information security state of distance education systems moodle and google classroom]. *Conference Proceedings of the Youth Science League*, 27-29, doi:10.36074/27.11.2020.v2.02.

Фонар Людмила Сергіївна – к.т.н., доцент кафедри штучного інтелекту та аналізу даних Національного університету «Одеська політехніка». Email: fonar_1_s@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7478-6742.

Коновалов Олександр Сергійович – аспірант кафедри штучного інтелекту та аналізу даних Національного університету «Одеська політехніка». Email: akonovalov.lux@gmail.com ORCID: 0000-0001-8023-9633.

Філіппов Євген Геннадійович – аспірант кафедри штучного інтелекту та аналізу даних Національного університету «Одеська політехніка». Email: 7161160@gmail.com ORCID: 0000-0002-9034-176X.

А.К. ЯЦЕНКО, В.І. ДУБРОВІН, Л.Ю. ДЕЙНЕГА
Національний університет «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ТРАФІКУ ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕНТРОПІЇ

Програмно-визначена мережа (SDN) – це підхід до створення мережі, яка використовує програмні контролери або інтерфейси прикладного програмування (API) для зв'язку з базовою апаратною інфраструктурою та напрямком трафіку в мережі замість фізичних маршрутизаторів і комутаторів.

Програмно-визначені мережі використовують централізований контролер, тому забезпечення надійності його роботи має дуже важливе значення для функціонування мережі.

Питання безпеки стає особливо гострим, коли кількість користувачів мережі зростає. Однією з найбільших і найпоширеніших загроз для програмно-визначених мереж є атака розподіленої відмови в обслуговуванні (DDoS).

Щоб виявити мережеві атаки, можна використовувати статистичні характеристики мережевого трафіку, такі як середнє значення вибірки, дисперсія вибірки, критерій χ^2 -квадрат Пірсона та теоретико-інформаційна міра – ентропія. Кількісно ентропія характеризується за допомогою ентропії розподілу ймовірностей К. Шеннона.

Інформаційна ентропія – це міра невизначеності, пов'язана з випадковою величиною. Ентропія характеризує ймовірність, з якою встановлюється той чи інший стан, є мірою хаотичності чи незворотності. Чим більша хаотичність системи, тим вище значення ентропії, і навпаки.

Програмні комплекси базуються на основі ентропійного аналізу мережевих даних, записаних датчиками NetFlow. Типові датчики підключаються до портів TAP або SPAN на комутаторах. Потіки аналізуються протягом фіксованих інтервалів часу. Зібрані потоки реєструються в базі даних, а потім аналізуються. Фільтри аномалій передбачені за напрямком, протоколом і підмережею. Далі розраховується значення ентропії додатних і від'ємних значень α для розподілу характеристик руху.

На етапі виявлення спостережувана ентропія порівнюється з мінімальними та максимальними значеннями, що зберігаються в профілі, і визначається поріг аномалії. Порогові значення менше 0 або більше 1 вказують на ненормальну концентрацію або дисперсію відповідно.

Одним із рішень для виявлення таких атак є використання ентропії синтезу. Цей метод дозволяє виявляти DDoS-атаки за час, близький до реального, а значення ентропії для нормального і шкідливого трафіку відрізняються на 90%.

Ключові слова: виявлення аномалій, ентропія, мережевий потік, вимірювання мережевого трафіку, програмно визначена мережа, DDoS-атака.

A.K. YATSENKO, V.I. DUBROVIN, L.Y. DEYNEGA
Zaporizhzhia Polytechnic National University

ANALYSIS OF SOFTWARE-DEFINED NETWORK TRAFFIC USING ENTROPY

Software-defined networking (SDN) is an approach to building a network that uses software controllers or application programming interfaces (APIs) to communicate with the underlying hardware infrastructure and route network traffic instead of physical routers and switches.

Software-defined networks use a centralized controller, so ensuring the reliability of its operation is very important for the functioning of the network.

The issue of security becomes especially acute when the number of network users increases. One of the biggest and most common threats to software-defined networks is a distributed denial of service (DDoS) attack.

To detect network attacks, statistical characteristics of network traffic such as the sample mean, sample variance, Pearson's chi-square test, and the information-theoretic measure entropy can be used. Quantitatively, entropy is characterized using the entropy of C. Shannon's probability distribution.

Information entropy is a measure of uncertainty associated with a random variable. Entropy characterizes the probability with which a certain state is established, it is a measure of chaos or irreversibility. The greater the chaos of the system, the higher the value of entropy, and vice versa.

Software complexes are based on entropy analysis of network data recorded by NetFlow sensors. Typical sensors connect to TAP or SPAN ports on switches. Streams are analyzed during fixed time intervals. The collected streams are registered in a database and then analyzed. Anomaly filters are provided by direction, protocol, and subnet. Next, the entropy value of positive and negative values of α for the distribution of motion characteristics is calculated.

In the detection step, the observed entropy is compared with the minimum and maximum values stored in the profile, and an anomaly threshold is determined. Threshold values less than 0 or greater than 1 indicate abnormal concentration or variance, respectively.

One solution to detect such attacks is to use fusion entropy. This method allows you to detect DDoS attacks in a time close to real, and the entropy values for normal and malicious traffic differ by 90%.

Keywords: anomaly detection, entropy, netflow, network traffic measurement, software-defined network, DDoS-attack.

Постановка проблеми

Одним із найефективніших індикаторів аномальної поведінки мережі є аналіз трафіку в реальному часі. Виявлення аномалій – це виявлення спостережень, які не відповідають очікуваній поведінці. Для цього використовуються різні параметри мережевого трафіку, такі як адреси та порти джерела та призначення, кількість підключень тощо.

Програмно-визначена мережа (software-defined network, SDN) – це підхід до побудови мережі, яка використовує програмні контролери або інтерфейси прикладного програмування (application programming interface, API) для зв'язку з основною апаратною інфраструктурою та маршрутизації мережевого трафіку замість фізичних маршрутизаторів і комутаторів.

Мережі передачі даних є місцем, яке обмежує зростання продуктивності додатків із зростанням кількості користувачів. У мережах SDN завдання комутації трафіку та завдання управління суворо розділені. Контролер виступає джерелом керуючої логіки.

Існує три частини типової архітектури SDN:

- програми, які надають запити ресурсів або інформацію про мережу в цілому;
- контролери, які використовують інформацію з програм, щоб вирішити, як маршрутизувати пакет даних;
- мережеві пристрої, які отримують інформацію від контролера про те, куди були переміщені дані.

Програмно-визначені мережі використовують централізований контролер, тому забезпечення надійності його роботи має дуже важливе значення для функціонування мережі [1].

Питання безпеки стає особливо гострим, коли кількість користувачів мережі зростає. Однією з найбільших і найпоширеніших загроз для програмно-визначених мереж є атака розподіленої відмови в обслуговуванні (distributed denial of service, DDoS).

DDoS-атака – хакерська атака на комп'ютерну систему з метою виведення її з ладу. Це створення таких умов, за яких чесні користувачі не зможуть отримати доступ до системних ресурсів (серверів), або цей доступ буде ускладнений [2]. Він може знищити доступні мережеві служби користувача, серйозно загрожуючи мережі. Коли зловмисники надсилають у мережу шкідливі пакети даних, звичайний трафік не може бути оброблений через споживання мережевих ресурсів. У результаті мережі та сервери блокуються, а звичайні послуги перериваються. SDN часто є мішенню для DDoS-зловмисників через централізований контроль.

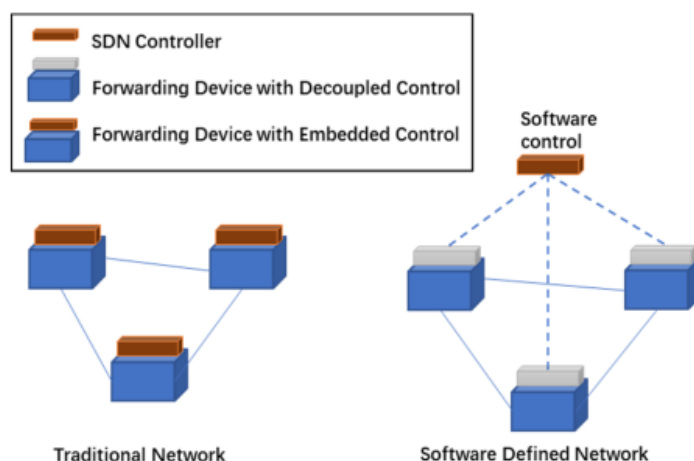


Рис. 1. Відокремлене керування в SDN проти традиційної мережі [3]

Ефективним способом виявлення атак у мережах є аналіз трафіку. Вимірювання параметрів трафіку та їх аналіз допоможе нам вчасно визначити ризик атаки.

Вивчення аномалій на основі ентропії вивчається для вдосконалення традиційних підходів до аналізу мережевого потоку на основі обсягу та правил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Характер руху залежить від багатьох факторів, таких як час доби або день тижня. Методи аналізу даних дозволяють за його параметрами виявляти аномальний характер трафіку. Відмінності між нормальним і аномальним інтернет-трафіком протягом дня показано на рис. 2-3

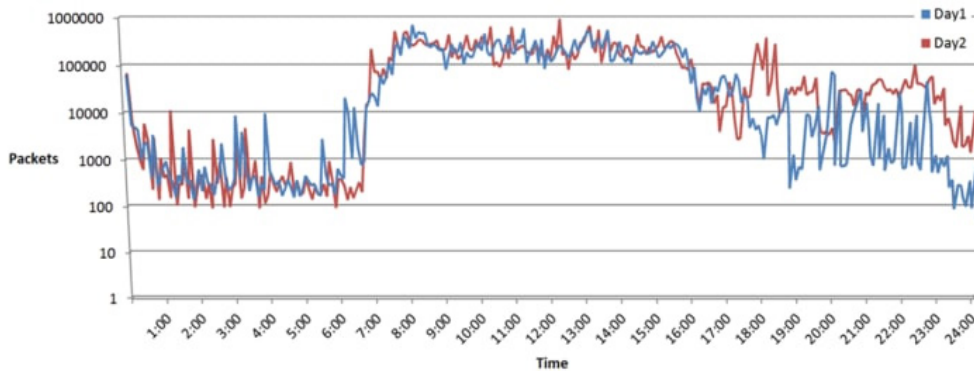


Рис. 2. Профіль нормального трафіку за кількістю пакетів [4]

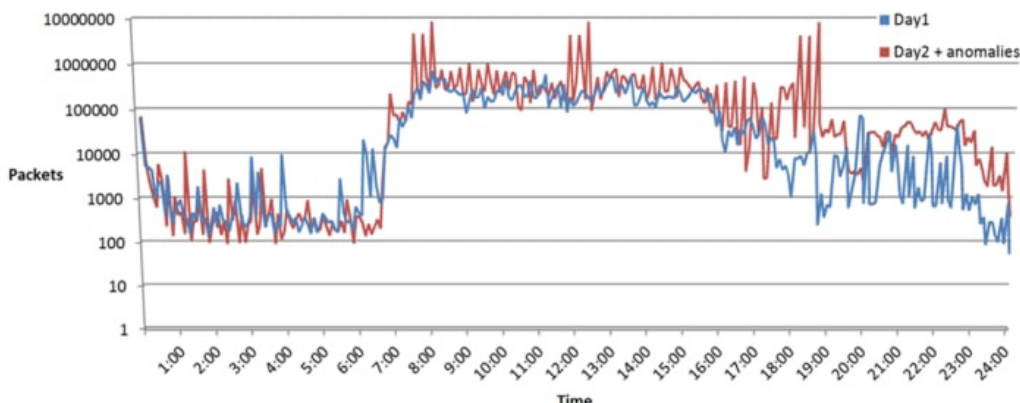


Рис. 3. Легітимний і аномальний трафік за кількістю пакетів [4]

Видно, що атаки видно на профілі трафіку як раптові піки. Однак пошук за атаками вручну неефективний, оскільки це буде повільний процес із високою ймовірністю помилки.

Для аналізу трафіку використовуються різні методи, такі як: вейвлет-аналіз, кластерний аналіз та інформаційна ентропія.

Вейвлет аналіз

Вейвлет-аналіз полягає в побудові коефіцієнтів, які використовуються в розкладі вихідного сигналу за базисними функціями. Сигналом можна вважати інтенсивність мережевого трафіку [5] або дані про співвідношення IP-адрес призначення [6]. Виконання вейвлет-перетворення дозволяє виділити найбільш значущу інформацію як сигнал, що відповідає коливанням з високою амплітудою, і ігнорувати менш корисну інформацію в коливаннях з низькою амплітудою як шумову складову. Концепцію вейвлета ввели Гроссман і Морле (рис. 4).

Вейвлет-перетворення дуже схоже на віконне перетворення Фур'є, але методи використання інших функцій оцінки. Вейвлет-перетворення, на відміну від перетворення Фур'є, не розкладає сигнал на складові у вигляді синусів і косинусів, а використовує особливості, локалізовані як в реальному просторі, так і в просторі Фур'є.

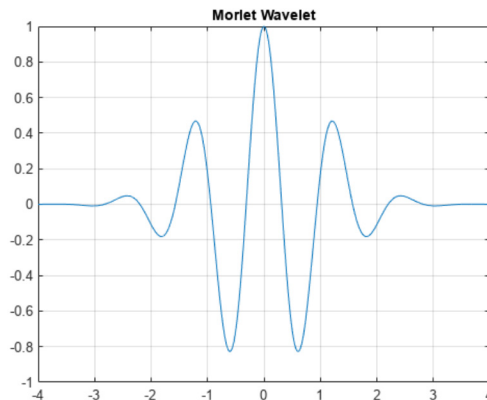


Рис. 4. Вейвлет Морле [7]

Перевага вейвлет-перетворення полягає в тому, що воно покриває фазову площину комірками однакової площі, але різної форми. Це дозволяє нам добре локалізувати низькочастотні деталі сигналу в частотній області (домінуючі гармоніки), а високочастотні деталі в часовій області (раптові стрибки, піки тощо).

Недоліками вейвлет-аналізу є неоднозначність вибору базисних функцій, висока обчислювальна складність при обчисленні коефіцієнтів розкладання сигналу. Крім того, завдання правильного налаштування розміру вікна не є тривіальною. Як зазначено в [8], якщо розмір ковзного вікна набагато більший за тривалість аномалії, то атака буде пропущена, оскільки сплеск частоти, що відповідає тривалості, може бути згладжений. Інакше, якщо розмір вікна занадто малий, то потік безглузких аномалій неминучий.

Кластерний аналіз

Суть кластерного аналізу полягає у виділенні з мережевого трафіку таких характеристик, які дозволять розділити класифіковані об'єкти (пакети, з'єднання) на групи, що відповідають нормальному функціонуванню мережевої взаємодії. Усі інші екземпляри, які не потрапляють у сконструйовані ділянки, класифікуються як аномальні [9].

Розрізняють ієрархічні (агломераційний і розділовий) та неієрархічні (метод k-середніх, двоетапний кластерний аналіз, метод найближчого сусіда) методи кластерного аналізу. Однак загальноприйнятої класифікації методів кластерного аналізу не існує, і вони включають багато алгоритмів машинного навчання, які вирішують проблему поділу сукупності на однорідні групи (рис. 5).

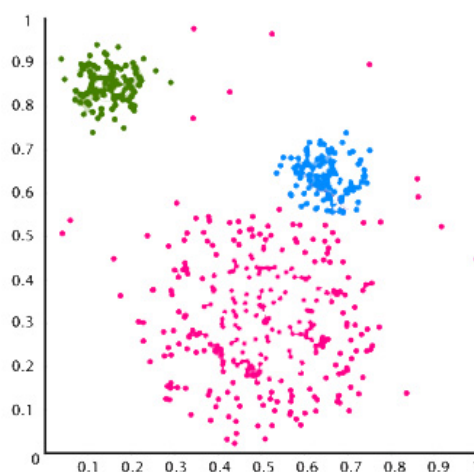


Рис. 5. Приклад кластерів

Великою перевагою кластерного аналізу є те, що він дозволяє розбивати об'єкти не за одним параметром, а за цілим набором ознак. Крім того, кластерний аналіз, на відміну від більшості математичних і статистичних методів, не накладає жодних обмежень на тип об'єктів, що розглядаються, і дозволяє розглядати набір вихідних даних практично довільного характеру. Кластерний аналіз дозволяє розглядати досить великий обсяг інформації і різко скорочувати великі обсяги інформації, роблячи їх компактними і наочними.

Основними недоліками кластерного аналізу є упереджені вибірки та високі помилки вибірки. Якщо кластери, що представляють всю сукупність, були сформовані на основі упередженої думки, висновки щодо всієї сукупності також будуть упередженими.

Інформаційна ентропія

Ентропійний аналіз використовується при виявленні атак для формування статистичного критерію, щоб перевірити, чи належить досліджуваній екземпляр до класу відхилень [10].

Основна ідея методу полягає в побудові моделі, яка б максимізувала значення ентропії. Це відповідає припущенню, що зі збільшенням кількості унікальних записів вони рівномірно розподіляються відносно обраних класів множини, що призводить до зростання ентропії.

Щоб виявити аномалії, автори [11] спочатку застосовують метод максимальної ентропії для створення нормальної моделі, в якій обрані класи мережевих пакетів мають найкращий рівномірний розподіл. Потім умовна ентропія використовується для виявлення відмінностей між розподілом класів пакетів у поточному трафіку порівняно з розподілом, отриманим за допомогою методу максимальної ентропії.

Основна перевага ентропії полягає в тому, що вона дозволяє встановлювати різні ваги для атрибутів, визначаючи важливість кожного параметра для поточного завдання. Її вважають придатним для всіх процесів прийняття рішень, що вимагають визначення ваги. Ентропія може забезпечити кількісну міру вмісту інформації, яка може порівнювати та аналізувати ефект використання різних статистичних моделей, алгоритмів і пов'язаних налаштувань: що нижча ентропія критерію, то більш цінну інформацію містить критерій. Метод вимірює невизначеність змінних і оцінює вплив основних факторів на результат.

Основним недоліком методу оцінки ентропійної ваги була висока чутливість значущості до значень ентропії різних критеріїв. Але значення ентропії показали вищу чутливість для оцінки ваги до наборів даних вищої розмірності, ніж до менших розмірів [12].

В результаті аналізу було вирішено використовувати інформаційну ентропію для аналізу трафіку.

Мета дослідження

Основна мета дослідження – довести, що підхід, заснований на ентропії, підходить для виявлення сучасних шкідливих програм, схожих на ботнет, на основі аномальних мережевих шаблонів.

Щоб виявити атаки у мережі, ви можете використовувати її статистичні характеристики як параметри мережевого трафіку, такі як середнє значення вибірки, дисперсія вибірки, критерій χ^2 -квадрат Пірсона та теоретико-інформаційна міра – ентропія. Кількісно ентропія характеризується за допомогою ентропії розподілу ймовірностей К. Шеннона.

Мета полягає в тому, щоб підвищити ефективність систем виявлення вторгнень, систем виявлення аномалій і систем управління інформаційною безпекою, провести теоретичні та експериментальні дослідження щодо можливості використання обчислених у реальному часі значень інформаційної ентропії як базової атаки і індикатор мережевих послуг.

Інформаційна ентропія – це міра невизначеності, пов'язана з випадковою величиною. Ентропія характеризує ймовірність P , з якою встановлюється той чи інший стан, є мірою хаотичності чи незворотності [13]. Чим більша хаотичність системи, тим вище значення ентропії, і навпаки.

$$H_s(X) = \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_a \frac{1}{p(x_i)} \tag{1}$$

де X – знак, який може приймати значення $\{x_1, \dots, x_n\}$,
 $p(x_i)$ – функція ймовірності результату x_i ,
 n – кількість можливих станів.

З метою виявлення аномалій зазвичай використовуються вибіркові ймовірності, оцінені кількістю випадків x і у часовому вікні t . Значення ентропії залежить від випадковості (вона досягає максимуму, коли ймовірність $p(x_i)$ однакова для всіх x_i), а також від значення n . Щоб вимірювати лише випадковість, слід застосовувати нормалізовані форми.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для цієї роботи було розроблено програмне забезпечення для розрахунку ентропії. В якості вихідних даних для тестування програмного забезпечення були взяті значення параметрів моделювання DDoS-атаки, отримані при розробці методики ентропійних досліджень Бабенко Т. В. [14]. Їх можна побачити в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри моделювання DDoS-атаки

№ послідовності	Розмір послідовності (паketу)	Тривалість збору пакетів	
		Нормальний режим	Режим моделювання атаки
1	50 000	15	2
2	100 000	30	3
3	150 000	60	5

Кількість пакетів за секунду є найбільш очевидним показником наявності або відсутності DDoS-атаки. Ці параметри дозволяють аналізувати трафік за часом збору певної кількості пакетів (50000, 100000, 150000). Для експерименту також додали опцію, що 50 000 пакунків збирають за 145 хвилин. Незважаючи на те, що це не атака, визнання такої події аномальною дозволить завчасно виявити проблеми в мережі (наприклад, збій обладнання).

Окрім кількості пакетів за секунду, аналізувалися IP-адреси джерела та призначення. Ймовірність атаки є високою в таких випадках: або аномально багато пакетів надходять з однієї адреси (DoS), або аномально багато запитів надходять на одну адресу (DDoS). Аналіз декількох параметрів підвищить точність виявлення.

За цими параметрами розраховується значення ентропії. Після цього значення порівнюється зі звичайним профілем трафіку шляхом розрахунку порогу аномалії. Значення різних параметрів (пакетів за секунду, адрес джерела та призначення) аналізуються разом і визначається остаточна ймовірність атаки.

Архітектура кінцевого програмного комплексу наведена на рис. 6.

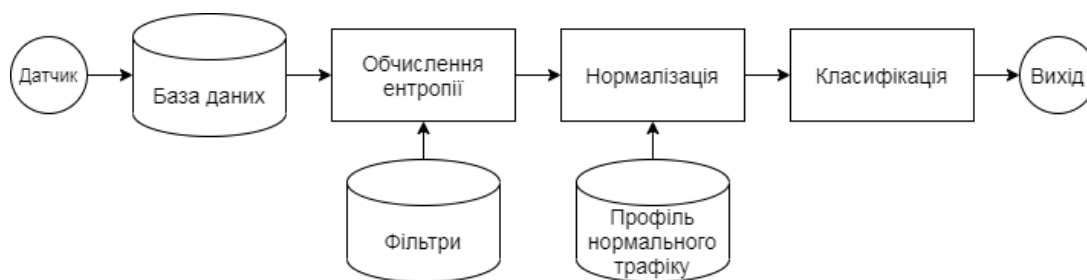


Рис. 6. Схема програмного комплексу

Кінцевий програмний комплекс збиратиме дані, зареєстровані датчиками NetFlow. Типові датчики, такі як маршрутизатори або спеціальні датчики (наприклад, Softlowd), будуть підключені до портів TAP або SPAN на комутаторах. Потoki будуть аналізуватися протягом фіксованих інтервалів часу (кожні 5 хвилин). Зібрані теми будуть зареєстровані в базі даних. Після цього до зібраних даних будуть застосовані фільтри вибору функцій, щоб отримати необхідні характеристики (пакети за секунду, адреси джерела та призначення тощо). Потім для кожного параметра обчислюються значення ентропії. На етапі нормалізації значення порогу обчислюється за допомогою звичайного профілю трафіку. Після обчислення порогових значень можна класифікувати випадок і визначити, чи характер трафіку є зловмисним чи ні.

Розроблене програмне забезпечення має виявляти аномальну поведінку мережі за розрахованим пороговим значенням. Для послідовностей 1-3 у режимі моделювання атаки значення мають бути від’ємними, тоді як для послідовності 4 у режимі атаки вони мають бути більшими за 1. Для нормального режиму поріг має бути в діапазоні від 0 до 1.

Результати розрахунку порогу наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати класифікації

№ послідовності	Розмір послідовності (пакету)	Розрахований поріг	
		Нормальний режим	Режим моделювання атаки
1	50 000	0,08	-0,18
2	100 000	0,4	-0,15
3	150 000	0,96	-0,08
4	50 000	0,96	1,12

Видно, що значення порогу чітко вказує на наявність аномалії – значення менше 0 для аномальної концентрації та значення більше 1 для аномальної дисперсії. Це підтверджує ефективність запропонованого методу виявлення атак.

Розраховані пороги можуть бути використані в подальшому аналізі всього трафіку. Врахування кількох параметрів допоможе зробити аналіз більш точним і виявити джерела проблем.

Висновки

Завдання розробки програмного забезпечення для виявлення шкідливого трафіку є надзвичайно важливим як для звичайних, так і для програмно-визначених мереж. Крім того, питання безпеки та захисту в програмно-визначених мережах є надзвичайно важливим, оскільки управління централізовано в контролері SDN, що робить його вразливим до атак. Аналіз на основі ентропії дозволяє виявити загрози на ранній стадії та вчасно усунути джерело проблеми.

У цій статті розглядаються можливості використання ентропії для аналізу трафіку програмно визначеної мережі. Ентропійний аналіз є потужним інструментом у боротьбі з мережевими загрозами, такими як DDoS-атаки.

Ентропійний аналіз був розроблений для виявлення аномальної поведінки мережі. Кількість пакетів за секунду, IP-адреси джерела та призначення пакетів використовувалися як вхідні значення для аналізу, оскільки вони є найбільш яскравими індикаторами наявності чи відсутності атаки. Результат обчислення ентропії порівнюється зі звичайним профілем трафіку.

У роботі запропоновано архітектуру програмного комплексу. Таке програмне забезпечення дозволить підвищити безпеку в програмно-визначених мережах і знизити вразливість контролера SDN до DDoS-атак.

Надалі планується вдосконалити роботу програмного комплексу. До аналізу планується додати більше параметрів, таких як середня тривалість потоку, кількість вхідних і вихідних з’єднань на хост.

Крім того, планується розробити алгоритм оцінки набору отриманих значень. Такий алгоритм враховуватиме ваги параметрів, тому найбільш очевидний показник атаки матиме найбільший вплив на вихід результату.

Список використаної літератури

1. G What is Software-Defined Networking (SDN)? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.vmware.com/topics/glossary/content/software-defined-networking.html>
2. DoS атака [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [uk.wikipedia.org/wiki/DoS attack](http://uk.wikipedia.org/wiki/DoS_attack)
3. Fan C., Kaliyamurthy N.M., Che S., Jiang H., Zho Y. and Campbell C. Detection of DDoS Attacks in Software Defined Networking Using Entropy. 2022, 12, 370.
4. Bereziński P., Jasiul B. and Szpyrka M. An entropy-based network anomaly detection method, *Entropy*. 2015, 17(4). P. 2367-2408.
5. Barford P., Plonka D. Characteristics of Network Traffic Flow Anomalies. *Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement*. 2001. P. 69–73.
6. Kim S.S., Reddy A.L. Statistical techniques for detecting traffic anomalies through packet header data. *IEEE/ACM TON*. 2008. V. 16. Issue 3. P. 562–575.
7. Morlet wavelet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/morlet.html>
8. Barford P., Kline J., Plonka D., Ron A. A signal analysis of network traffic anomalies. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet measurement*. 2002. P. 71–82.
9. Lee K., Kim J., Kwon K.H., Han Y., Kim S. DDoS attack detection method using cluster analysis. *Expert Systems with Applications*. 2008. V. 34. Issue 3. P. 1659–1665.
10. Branitskiy A., Kotenko I. Analysis and Classification of Methods for Network Attack Detection. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, 2(45):207.
11. Gu Y., McCallum A., Towsley D. Detecting Anomalies in Network Traffic Using Maximum Entropy Estimation. *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement*. 2005. P. 32–32.
12. Robert M.X. Wu, Yongwen Wang. Which Objective Weight Method Is Better: PCA or Entropy?. *Scientific Journal of Research and Reviews*, 2022.
13. Shannon C. A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J.* 1948, 27, 379–423.
14. Бабенко Т. В. Дослідження ентропії мережевого трафіка як індикатора DDOS-атак. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2013. № 2. С. 86-89.

References

1. G What is Software-Defined Networking (SDN)? [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.vmware.com/topics/glossary/content/software-defined-networking.html>
2. DoS attack [Electronic resource]. – Access mode: [uk.wikipedia.org/wiki/DoS attack](http://uk.wikipedia.org/wiki/DoS_attack)
3. Fan, C., Kaliyamurthy, N.M., Che, S., Jiang, H., Zho, Y. & Campbell, C. (2022). Detection of DDoS Attacks in Software Defined Networking Using Entropy. **12**, 370.
4. Bereziński, P., Jasiul, B., & Szpyrka, M. (2015). An entropy-based network anomaly detection method, *Entropy*. **17**(4), 2367-2408.
5. Barford, P., & Plonka, D. (2001). Characteristics of Network Traffic Flow Anomalies. *Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement*. 69–73.
6. Kim, S.S., & Reddy, A.L. (2008). Statistical techniques for detecting traffic anomalies through packet header data. *IEEE/ACM TON*. **16** (3), 562–575.
7. Morlet wavelet [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/morlet.html>
8. Barford, P., Kline, J., Plonka, D., & Ron, A. (2002). A signal analysis of network traffic anomalies. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet measurement*. 71–82.

9. Lee, K., Kim, J., Kwon, K.H., Han, Y., & Kim, S. (2008). DDoS attack detection method using cluster analysis. *Expert Systems with Applications*. **34** (3), 1659–1665.
10. Branitskiy, A., & Kotenko, I. (2016). Analysis and Classification of Methods for Network Attack Detection. *SPIIRAS Proceedings*. **2** (45):207.
11. Gu, Y., McCallum, A., & Towsley, D. (2005). Detecting Anomalies in Network Traffic Using Maximum Entropy Estimation. *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement*. 32–32.
12. Robert, M.X. Wu, Yongwen, Wang. (2022). Which Objective Weight Method Is Better: PCA or Entropy?. *Scientific Journal of Research and Reviews*.
13. Shannon, C. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J.* **27**, 379–423.
14. Babenko, T. V. (2013). Research on the entropy of tethered traffic as an indicator of DDOS attacks. *Science Bulletin of the National Grooming University*. **2**, 86-89.

Яценко Анастасія Костянтинівна – студентка кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка». E-mail: nastyu.yatsenko.zp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5675-5205.

Дубровін Валерій Іванович – професор кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка». E-mail: vdubrovin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0848-8202.

Дейнега Лариса Юріївна – старший викладач кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка». E-mail: deynega.larisa@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0304-4327.

ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Технічний редактор

Литвиненко Олена Іванівна
к.т.н., доцент

Верстка

Наталія Кузнєцова

Здано до набору 15.12.2022 р. Підписано до друку 22.12.2022 р.
Гарнітура Times New Roman. Формат 60×84/8.
Друк офсетний. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 13,72. Зам. № 0523/342. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК No 7623 від 22.06.2022 р.